

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS

Programa de Pós-graduação em Agronomia

Área de Concentração: Solos



TESE

**Emissões de Metano e Óxido Nitroso em Sistemas de Cultivo
em Terras Baixas sob Diferentes Manejos de Água, do Solo e
da Cobertura Vegetal**

Gerson Lübke Buss

Pelotas, 2016

GERSON LÜBKE BUSS

**Emissões de Metano e Óxido Nitroso em Sistemas de Cultivo
em Terras Baixas sob Diferentes Manejos de Água, do Solo e
da Cobertura Vegetal**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Agronomia da Universidade Federal de
Pelotas, como requisito à obtenção do título de
Doutor em Ciências (área do conhecimento:
Solos).

Orientador: Prof. Dr. Rogério Oliveira de Sousa

Co-orientadora: Pesq. Dra. Walkyria Bueno Scivittaro

Pelotas, 2016

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

B981e Buss, Gerson Lübke

Emissões de metano e óxido nitroso em sistemas de cultivo em terras baixas sob diferentes manejos de água, do solo e da cobertura vegetal / Gerson Lübke Buss ; Rogério Oliveira de Sousa, orientador ; Walkyria Bueno Scivittaro, coorientadora. — Pelotas, 2016.

122 f.

Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, 2016.

1. Oriza sativa L.. 2. Gases de efeito estufa. 3. Sistemas de cultivo. 4. Manejos de água. I. Sousa, Rogério Oliveira de, orient. II. Scivittaro, Walkyria Bueno, coorient. III. Título.

CDD : 631.4

Banca examinadora:

Professor, Dr. Rogério Oliveira de Sousa – (Presidente)

Faculdade de Agronomia “Eliseu Maciel” – UFPel

Pesquisadora, Dra. Carla Machado da Rosa

Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária - FEPAGRO

Professora, Dra. Flavia Fontana Fernandes

Faculdade de Agronomia “Eliseu Maciel” – UFPel

Pesquisador, Dra. Rosa Maria Vargas Castilhos

Faculdade de Agronomia “Eliseu Maciel” – UFPel

“A melhor maneira de ser feliz é contribuir para a felicidade dos outros.”
(Confúcio)

A minha esposa Fernanda
DEDICO

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, que me deu saúde, força e o privilégio de alcançar mais este objetivo.

Ao professor Dr. Rogério Oliveira de Sousa, pela orientação, amizade, confiança e contribuição na minha formação. E a todos os professores do curso de Pós-Graduação em Agronomia (Solos) pelos ensinamentos e assim contribuindo para o meu engrandecimento profissional.

À pesquisadora da EMBRAPA Dra. Walkyria Bueno Scivittaro, pela co-orientação, pelos ensinamentos e apoio. E aos demais pesquisadores, funcionários, e estagiários da Embrapa Clima Temperado que investiram e trabalharam junto na condução dos experimentos.

Aos bolsistas Marcelo Machado Soncini, Claudia Filomena Schneider Sehn e Anderson Silveira e, também aos demais orientados do Prof. Rogério: Roberto Wolter, Juliana Brito, Marcos Pará, Jaqueline Trombetta, Thais A. Veçozzi e Vairton Radmann pela amizade, convívio e ajuda na execução dos experimentos.

Ao professor da UFRGS Cimélio Bayer por todo apoio, assim também como às colegas de pós do PPG Ciência do Solo/UFRGS e, principalmente, Carla da Rosa e a Daiane dos Santos pela parceria nas atividades, esforço, conhecimento e amizade.

Aos colegas de curso, pelas discussões, estudos e companheirismo, assim também como os demais amigos e colegas do PPGA – Solos pela convivência no âmbito da pós, trocas de experiências e o convívio social.

Aos Funcionários do Departamento de Solos e do Programa de Pós-graduação em Agronomia.

Ao Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa por um período de 19 meses.

À Universidade Federal de Pelotas, ao Programa de Pós-graduação em Agronomia e ao Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia “Eliseu Maciel”, pela oportunidade de realização do curso de Doutorado.

A minha esposa Fernanda Krumreich, por estar sempre ao meu lado nessa caminhada, pelo amor, compreensão e principalmente apoio durante a realização do curso de Doutorado.

Agradeço aos meus pais, Silvino e Eldina Buss, e irmãos, Gerderson (cunhada Rosane) e Joseane (cunhado Dioni), pela forma carinhosa com que me apoiaram e encorajaram sem medir esforços durante a realização do curso de Doutorado.

Agradeço também a todos os meus colegas da EMATER/RS – ASCAR, aos demais amigos e a todos que de alguma forma contribuíram para a viabilização deste trabalho, um sincero MUITO OBRIGADO.

RESUMO

BUSS, Gerson Lübke. **Emissões de Metano e Óxido Nitroso em Sistemas de Cultivo em Terras Baixas sob Diferentes Manejos de Água, do Solo e da Cobertura Vegetal**. 2016. 122p. Tese - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Área de Concentração: Solos. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas - Brasil.

O sistema de irrigação, as práticas de manejo da água e manejos diferenciados de preparo do solo para o cultivo do arroz são fatores determinantes à produção deste cereal, influenciando de forma diferenciada o efluxo de gases de efeito estufa (GEE), sendo que alguns desses apresentam potencial mitigador das emissões de GEE. Três estudos foram conduzidos visando avaliar: (I) as condições de oxirredução do solo e a influência de manejos de água sobre as emissões de metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O) (GEE) em solo cultivado com arroz (Estudo I); (II) avaliar a influência de dois sistemas de irrigação (Inundação e Aspersão) sobre as emissões de CH_4 e N_2O em solo cultivado com arroz, sendo essas emissões comparadas com uma área natural (Estudo II) e, (III) avaliar a influência da época e das operações de preparo do solo e da cobertura vegetal sobre as emissões anuais de CH_4 e N_2O do solo, bem como a contribuição desses gases para o potencial de aquecimento global parcial (PAGp) em sistema de produção de grãos em terras baixas e, com isso, definir práticas de manejo e sistemas de cultivos com potencial mitigador de emissões de GEE em terras baixas (Estudo III). Os estudos foram conduzidos de novembro de 2011 até abril de 2015, em um Planossolo no Sul do Brasil. Na maior parte do período as avaliações de CH_4 e N_2O foram realizadas semanalmente, utilizando-se o método da câmara fechada estática. Com base nas emissões de CH_4 e de N_2O e dos seus respectivos potenciais de aquecimento global (PAG; 25 e 298), foi calculado o PAGp (PAGp; CO_2 equivalente). Foram avaliados também o volume de água aplicado e a produtividade de grãos (PG), possibilitando a obtenção dos índices de eficiência do uso de água (EUA) e PAGp/PG. No Estudo I foram avaliados os tratamentos nas safras 2011/12 e 2012/13: Inundação Contínua (IC); Inundação Contínua por Período Reduzido (PR); Inundação Intermitente (II); Solo Saturado (SS). Nas duas safras avaliadas, nos manejos da irrigação II e SS, a redução das emissões de CH_4 foi superior ao efeito no aumento nas emissões de N_2O , ou seja, apresentaram o menor PAGp, mostrando-se mais eficientes na mitigação de GEE em relação aos outros dois tratamentos, IC e PR. No Estudo II - foram avaliados por dois anos completos (duas Safras e duas Entressafras) os tratamentos: Sistema de Irrigação por Inundação; Sistema de Irrigação por Aspersão; Área Natural: área em condição natural, ou seja, sem histórico de cultivo. Apesar do sistema de irrigação por aspersão potencializar as emissões de N_2O do solo, ainda assim, é mais eficiente na redução do PAGp em relação ao sistema irrigado por alagamento do solo em cultivos de arroz. No Estudo III - foram avaliados por dois anos completos (duas Safras e duas Entressafras) quatro sistemas de cultivo: T1 – Arroz/soja/arroz; T2 – Arroz/Arroz/Arroz; T3 – Arroz/Arroz/Soja; T4 – Arroz/Soja/Arroz c/ preparo. O N_2O é o principal componente do potencial de aquecimento global da soja, enquanto que o CH_4 predomina no cultivo de arroz irrigado.

Palavras-chave: *Oriza sativa* L., Gases de efeito estufa, Sistemas de cultivo e manejos de água.

ABSTRACT

BUSS, Gerson Lübke. **Methane and Nitrous Oxide Emissions in Lowland Crop Systems under Different Water, Soil and Plant Cover Management.** 2016. 122p. Tese - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Área de Concentração: Solos. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas - Brasil.

Irrigation system, the water management practices and differentiated tillage managements for rice cultivation are determining factors in the production of this cereal, influencing differently efflux of greenhouse gases (GHG), and some of these have potential mitigating GHG emissions. Three studies were conducted to evaluate: (I) the conditions of soil redox and the influence of water management on methane emissions (CH_4) and nitrous oxide (N_2O) (GHGs) in soil cultivated with rice (Study I); (II) the influence of two irrigation systems (flood and aspersion) on emissions of CH_4 and N_2O in soil cultivated with rice and these emissions compared to a natural area (Study II) and, (III) the influence of the period, tillage operations and vegetation cover on the annual emissions of CH_4 and soil N_2O , as well as the contribution of these gases to the partial global warming potential (pGWP) in grain production system in the lowlands and, with this, set management practices and cropping systems with potential mitigating GHG emissions in lowlands (Study III). The studies were conducted from November 2011 to April 2015, on a Alvaquall in southern Brazil. In most of the period the CH_4 and N_2O evaluations were made weekly using the method of static closed chamber. Based on CH_4 and N_2O and their respective potential of global warming (GWP, 25 and 298), the pGWP (pGWP; CO_2 equivalent) was calculated. They also evaluated the volume of water applied and grain yield (GY), making it possible to obtain the water use efficiency ratios (WUE) and pGWP / GY. In Study I evaluated the treatment in 2011/12 and 2012/13 seasons: Continuous flood (IC); Continuous flooding by Period Reduced (PR); Intermittent flooding (II); Soil saturated (SS). In two crops evaluated in the managements of irrigation II and SS reduction of CH_4 emissions was greater than the effect on increasing N_2O emissions, ie showed the lowest pGWP, being more efficient in GHG mitigation in relation to other two treatments, IC and PR. In Study II - were evaluated by two full years (two harvests and two dry season) treatments: Irrigation System Flood; Irrigation by Aspersion System; Natural Area: area in natural condition, ie no history of cultivation. Although the irrigation by Aspersion System potentiate N_2O emissions from soil, yet it is more effective in reducing pGWP relative to the irrigation system for flooding soil in rice crops. In Study III - were evaluated by two full years (two harvests and two dry season) four farming systems: T1 - rice / soy / rice; T2 - Rice / rice / rice; T3 - Rice / Rice / Soy; T4 - Rice / Soy / Rice w / preparation. N_2O is a major global warming potential of soy component, whereas CH_4 is predominant in irrigated rice.

Key words: *Oriza sativa* L., Greenhouse gases, Cropping systems and water management.

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO GERAL | 11 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 15 |
| 2.1 A Cultura do Arroz | 15 |
| 2.2 Produção de Metano e de Óxido Nitroso em Solos Alagados | 15 |
| 2.3 A Emissão de Metano e de Óxido Nitroso..... | 18 |
| 2.4 Fatores Ambientais que Afetam a Liberação de Metano e de Óxido Nitroso em Lavouras de Arroz Irrigado | 19 |
| 2.4.1 Estoque de Carbono | 19 |
| 2.4.2 Temperatura e Radiação Solar | 21 |
| 2.5 Influência de Práticas de Manejo na Emissão de GEE em Sistemas de Cultivo de Arroz Irrigado | 23 |
| 2.5.1 Variedades | 23 |
| 2.5.2 Fertilizantes | 24 |
| 2.5.3 Manejo da Água..... | 25 |
| 2.5.4 Sistemas de Cultivo..... | 29 |
| 2.5.5 Umidade do Solo no momento da Colheita do Arroz..... | 31 |
| 2.5.6 Diversificação de Culturas em Terras Baixas..... | 32 |
| 2.6 Hipóteses | 34 |
| 3 ESTUDO I: Influência de Manejos de Água sobre a Emissão de Metano e Óxido Nitroso em Solo Cultivado com Arroz..... | 35 |
| 3.1 RESUMO | 35 |
| 3.2 INTRODUÇÃO | 36 |
| 3.3 MATERIAL E MÉTODOS..... | 38 |
| 3.3.1 Condução dos Experimentos durante as Safras 2011/2012 e 2012/13 | 40 |
| 3.3.2 Coleta e Análise da Solução do Solo..... | 41 |
| 3.3.3 Amostragem e Análise dos Gases | 43 |
| 3.3.4 Parâmetros de Planta | 45 |
| 3.3.5 Volume de água utilizado..... | 45 |
| 3.3.6 Análise estatística..... | 45 |
| 3.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 45 |
| 3.4.1 Fluxo de Metano e Óxido Nitroso do Solo..... | 45 |
| 3.4.2 Emissão Total de Metano, Óxido Nitroso do Solo e o PAGp..... | 53 |

| | |
|---|-----|
| 3.4.3 Produtividade de Grãos, PAGp/PG e Eficiência do Uso da Água | 56 |
| 3.5 CONCLUSÃO | 58 |
| 4 ESTUDO II: Influência de Sistemas de Irrigação e Culturas (Sistemas de Cultivo) sobre a Emissão de Metano e Óxido Nitroso durante dois Anos Completos (duas Safras e duas Entressafras) | 59 |
| 4.1 RESUMO | 59 |
| 4.2 INTRODUÇÃO | 60 |
| 4.3 MATERIAL E MÉTODOS..... | 62 |
| 4.3.1 Condução dos Experimentos durante as Safras 2011/2012 e 2012/13 e também nas Entressafras:..... | 63 |
| 4.3.2 Amostragem e Análise dos Gases | 66 |
| 4.3.3 Parâmetros de Planta e Volume de Água Utilizado | 68 |
| 4.3.4 Análise Estatística | 68 |
| 4.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 68 |
| 4.4.1 Fluxo de Metano e Óxido Nitroso do Solo | 68 |
| 4.4.2 Emissão Total de CH ₄ , de N ₂ O e o Potencial de Aquecimento Global parcial (PAGp) | 73 |
| 4.4.3 Produtividades, Volume de Água Aplicado e Eficiência do Uso da Água | 76 |
| 4.5 CONCLUSÃO | 79 |
| 5 ESTUDO III: Emissão de Metano e Óxido Nitroso Associado a Épocas e Operações de Preparo do Solo e da Cobertura Vegetal em Áreas de Terras Baixas no Sul do Brasil | 80 |
| 5.1 RESUMO | 80 |
| 5.2 INTRODUÇÃO | 81 |
| 5.3 MATERIAL E MÉTODOS..... | 84 |
| 5.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 88 |
| 5.4.1 Fluxo de Metano e Óxido Nitroso do Solo | 88 |
| 5.4.2 Emissão Total de CH ₄ , de N ₂ O e o Potencial de Aquecimento Global parcial (PAGp) | 96 |
| 5.5 CONCLUSÕES | 102 |
| 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 104 |
| 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 105 |
| 8 APÊNDICES:..... | 117 |

1 INTRODUÇÃO GERAL

Nos últimos 150 anos têm-se percebido cada vez mais impactos antropogênicos que estão causando várias modificações no ambiente. Mas para o período anterior a 1950, há um número reduzido de pesquisas realizadas para quantificar as ações do homem sobre o meio. Crutzen e Stoermer (2000) propuseram que os efeitos humanos sobre o ambiente atingiram níveis graves o suficiente para se dar ao tempo em que vivemos, seu próprio nome - o “Antropoceno”. Eles propuseram colocar o início desse período em 1850, quando a era industrial começou a ganhar força em escala global, em apoio deste ponto de vista, há ampla evidência do impacto dos efeitos humanos em inúmeras variáveis ambientais desde 1850 (STEFFEN et al. 2007). Os solos foram profundamente erodidos, ecossistemas fragmentados, águas subterrâneas esgotadas e águas costeiras sufocadas com a proliferação de algas.

Outro fato importante é que mais de 85% do aumento da população global para o nível atual de 7 bilhões tem ocorrido desde 1850 e, para 2050 existe a estimativa de se chegar em 9 bilhões de pessoas e todos precisam (e precisarão) se alimentar, sendo que os recursos naturais são limitados, por isso precisa-se otimizar ao máximo a utilização desses recursos.

Em relação às concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa (GEE), três gases, o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O), começaram a aumentar exponencialmente desde 1850. Estes aumentos estão relacionados à mudança no uso da terra, mudanças causadas pelo rápido crescimento populacional e à queima de combustíveis fósseis. Esta ampla gama de provas não deixa dúvida de que a era industrial marca um importante ponto de inflexão das influências humanas sobre o meio ambiente (RUDDIMAN, 2013).

Os GEE são encontrados naturalmente na atmosfera terrestre. Juntos CO_2 , CH_4 e N_2O representam menos de 1% da composição atmosférica e são primordiais para a existência das diferentes formas de vida conhecidas no planeta. A presença destes gases mantém a temperatura média na superfície terrestre ao redor dos 15°C , por meio do chamado “efeito estufa natural” (BAIRD, 2002). Se não existisse o efeito estufa, a temperatura média na Terra seria em torno de -15°C e não existiria água na forma líquida, nem vida. Desde a revolução industrial, os níveis de CO_2 aumentaram de 280 ppmv (partes por milhão em volume) para além de 379 ppmv em 2005, enquanto o N_2O e CH_4 tiveram aumentos de 55 e 148%, respectivamente, no mesmo período. Ressalta-

se que o N_2O e CH_4 são emitidos em menores quantidades do que o CO_2 , porém apresentam, respectivamente, potencial de aquecimento 298 e 25 vezes, maior que o CO_2 (IPCC, 2007).

O CH_4 é um poderoso gás de efeito estufa produzido globalmente por processos bióticos e abióticos. O aumento da concentração de CH_4 na atmosfera provavelmente está ligado à interferência humana (RUDDIMAN, 2013). Há também evidências que indicam que as mudanças naturais na órbita reforçaram emissões de CH_4 da Terra a partir de zonas húmidas nos Trópicos do Hemisfério Sul (SINGARAYER et al., 2011). Enquanto continua o debate entre a hipótese antropogênica e a natural, é geralmente aceito que a atividade humana está por trás do aumento da concentração de CH_4 na atmosfera de cerca de 700 ppbv, no período pré-industrial, em 1750, para o valor corrente de aproximadamente 1800 ppbv (HEIMAN, 2011).

O relatório publicado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2007) também concluiu ser muito provável (90 a 99% de probabilidade) que a maior parte do aumento observado na temperatura média global se deva ao aumento das emissões de GEE pelo homem. Esta constatação decorre do fato de que muitas atividades antropogênicas são geradoras de GEE como, por exemplo, a queima de combustíveis fósseis, o desmatamento, as queimadas e a própria atividade agropecuária, entre outras.

A queima de combustíveis fósseis, em nível global, é a principal responsável pela emissão de GEE por ação antrópica (IPCC, 2007) e a atividade agropecuária, em conjunto com a mudança no uso da terra, representam aproximadamente 5%, 47% e 84% das emissões de CO_2 , CH_4 e N_2O , respectivamente (RICE, 2006). No Brasil, entretanto, a atividade agropecuária é a principal responsável pelas emissões de GEE, contribuindo com cerca de 75% das emissões de CO_2 , 94% das emissões de N_2O e 91% das emissões de CH_4 (EMBRAPA, 2006; CERRI & CERRI, 2007), principalmente em virtude do desmatamento seguido da queima da biomassa. Porém, é no setor agrícola que estão as opções menos onerosas para a mitigação das emissões de GEE, sendo que estas normalmente estão em consonância com as políticas governamentais de desenvolvimento sustentável.

Quanto a todas as atividades humanas envolvidas na produção e emissão de GEE, o cultivo de arroz irrigado por inundação do solo responde em nível mundial por 15% a 20% das emissões de CH_4 , cuja produção no solo está relacionada à decomposição microbiana de materiais orgânicos em ambiente anóxico (LE MER &

ROGER, 2001). Por outro lado, o incremento nas emissões de N_2O em áreas cultivadas com arroz inundado pode decorrer da aplicação de fertilizantes nitrogenados, mas ocorre, sobretudo, quando ocorrem episódios de drenagem do solo que causam alteração na umidade do solo (seco-úmido) (LIU et al., 2010).

No Brasil é necessário avançar nas pesquisas relativas à temática dos GEE, sobretudo para gerar informações específicas às condições locais. No entanto, devido à escassez de informações locais (LIMA et al., 2013), o inventário brasileiro das emissões de CH_4 baseia-se nos índices internacionais indicados pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), que considera a média das emissões de lavouras desenvolvidas em outras partes do mundo, cujas condições edafoclimáticas diferem das condições brasileiras. O fator de emissão utilizado pode, portanto, estar superestimando ou subestimando a real contribuição das lavouras de arroz para as emissões nacionais de CH_4 .

Acrescenta-se que o cálculo adotado no inventário para extrapolação das emissões totais de CH_4 aqui no Brasil, não leva em consideração todos os diferentes sistemas de manejo do solo adotados, bem como outros fatores determinantes dos fatores de emissão de lavouras de arroz irrigado. Portanto, é necessário realizar estudos visando obter fatores de emissão de CH_4 e N_2O em condições regionais e melhorar a compreensão dos processos e práticas agropecuárias na atividade orizícola que interferem nas emissões de GEE.

No Brasil, a produção de arroz ocupa uma área de aproximadamente 2,3 milhões de hectares anualmente, sendo o estado do Rio Grande do Sul (RS) responsável por 48% desta área, equivalendo a aproximadamente 1,1 milhões de hectares cultivados sob irrigação por inundação contínua (CONAB, 2015). A produção de arroz em áreas de terras baixas do RS envolve uma série de sistemas de cultivo e práticas agrícolas, como adubação e manejo da água de irrigação, que podem afetar de forma diferenciada as emissões de GEE. Assim, é importante identificar entre esses sistemas e práticas culturais utilizadas na cultura do arroz, alternativas capazes de mitigar as emissões desses gases e preferencialmente sem afetar a produtividade da cultura.

O manejo da água é uma das práticas mais importantes para a produção de arroz e também é tida como a opção mais promissora para a mitigação das emissões de CH_4 (TYAGI et al., 2010). O sistema de irrigação com inundação contínua proporciona condições anaeróbias no solo que favorecem a produção e a emissão de CH_4 (BUENDIA et al., 1997). Já práticas de drenagem durante o período de cultivo, como as

que ocorrem nos sistemas de irrigação intermitente, têm proporcionado grande eficiência na redução das emissões de CH_4 (TOWPRAYOON et al., 2005; TYAGI et al., 2010), pois a aeração temporária, embora tenha a ação de potencializar as emissões de N_2O , promove uma condição aeróbia no solo que suprime a metanogênese.

Na busca por economia no uso da água na lavoura orízicola alguns produtores da Fronteira Oeste do Rio Grande do Sul, região onde há menor disponibilidade hídrica quando comparada à região orízicola do Sul do estado, e por conta do relevo mais ondulado o uso de água para irrigação por inundação do arroz é maior, começaram a utilizar a irrigação por aspersão. O uso de água observado, no sistema de pivô central segundo estimativas dos produtores, situa-se em torno de 400 mm por ciclo, enquanto que, nesse ambiente o sistema de inundação utiliza mais do que o dobro dessa quantidade. O aumento da eficiência do uso da água por si só representa uma grande vantagem do sistema, podendo, por exemplo, ser quase triplicada a área irrigada num sistema de produção arroz-soja, utilizando-se o mesmo volume de água que no sistema de irrigação por inundação contínua no arroz. A economia no uso da água deste método foi significativa (40 a 50%) mostrando-se viável economicamente (CONCENÇO et al., 2009). Isso tem incentivado a expansão deste método de irrigação para lavouras de outras partes do estado, como, por exemplo, para as áreas de terras baixas da região Sul. Mas pouco se conhece da emissão de GEE nesse tipo de irrigação.

A adição ou manutenção de resíduos no solo também podem exercer efeitos distintos sobre as emissões de CH_4 e N_2O . A quantidade e qualidade do material orgânico são relevantes quando se verificam diferenças nas taxas de emissão destes gases. O aporte de resíduos fornece carbono ao sistema e favorece o processo de redução do solo, aumentando a produção de CH_4 . Por outro lado, a aplicação de resíduos orgânicos com bastante C no solo pode ser uma prática capaz de inibir as emissões de N_2O em solos cultivados com arroz. Resíduos com alta relação C:N podem estimular a imobilização microbiana do N, reduzindo a sua disponibilidade para os processos envolvidos na produção de N_2O (ROSA et al., 2011).

Em função do exposto, foi proposto o presente trabalho, com o objetivo de avaliar a influência de manejos da água de irrigação, do solo e da cobertura vegetal sobre as emissões de CH_4 e N_2O em Planossolo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A Cultura do Arroz

O arroz (*Oryza sativa*) é uma planta anual, pertencente à família Poaceae e originária do Japão. É adaptado ao ambiente aquático, devido à presença de um tecido (aerênquima) no colmo, que permite a circulação de gases no interior da planta e, consequentemente, trocas gasosas entre a atmosfera e a rizosfera.

A cultura do arroz irrigado foi introduzida no Brasil pelos portugueses na segunda metade do século XVI. As primeiras cultivares (tradicionais) utilizadas no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina pertenciam à subespécie japônica e caracterizavam-se por apresentar plantas de porte alto, com folhas largas e decumbentes, crescimento exuberante, baixa produtividade e ciclo vegetativo médio a longo. As primeiras cultivares de porte baixo (modernas) foram semeadas no Rio Grande do Sul a partir de 1973, mas somente 10 anos após, com o lançamento de genótipos que combinavam alto potencial produtivo e boa qualidade dos grãos, passaram a ocupar áreas expressivas. Diferentemente das anteriores, essas cultivares pertencem à subespécie índica. Apresentam porte baixo, folhas eretas, alta capacidade de perfilhamento, alto potencial produtivo e grãos longo-finos (SOSBAI, 2012).

Atualmente o arroz ocupa uma área de aproximadamente 2,3 milhões de hectares em todo o Brasil, sendo o estado do Rio Grande do Sul (RS) responsável por 48% desta área plantada e por 69% da produção nacional (CONAB, 2015). No Rio Grande do Sul, a maioria das lavouras de arroz emprega o sistema de irrigação por inundação, proporcionando condições anaeróbias no solo, que são bastante favoráveis à produção do arroz, aumentando a disponibilidade de nutrientes e o pH de solos ácidos. No entanto, favorece a produção de GEE, principalmente o CH₄ (SILVA et al., 2008).

2.2 Produção de Metano e de Óxido Nitroso em Solos Alagados

Em áreas cultivadas com arroz irrigado, o alagamento do solo promove inúmeras modificações nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. A atividade biológica do solo alagado é alterada em consequência do consumo do O₂ remanescente (NEUE et al., 1997), proliferando os micro-organismos anaeróbios facultativos e obrigatórios (PONNAMPERUMA, 1972; NEUE et al., 1997). Os micro-

organismos obtêm energia para a realização de seus processos vitais às custas da oxidação do carbono (C) dos compostos orgânicos, por meio de reações de oxidação e redução (reações redox). Diferentemente dos micro-organismos aeróbios, que utilizam o O_2 comoceptor final de elétrons, os micro-organismos anaeróbios usam compostos inorgânicos oxidados do solo como NO_3^- , Mn^{4+} , Fe^{3+} e SO_4^{2+} como eletroceptores (CAMARGO et al., 1999).

Quando ocorre a diminuição da disponibilidade dos aceptores inorgânicos, os micro-organismos anaeróbios passam a utilizar aceptores de origem orgânica, caracterizando um processo conhecido como fermentação. A fermentação constitui-se em um dos principais processos bioquímicos responsáveis pela decomposição dos compostos orgânicos em solos alagados (NEUE et al., 1997), cujos produtos resultantes são predominantemente etanol, acetato, H_2 , N_2 , CO_2 e CH_4 (MOSIER et al., 1989). O CH_4 é um dos produtos da etapa final de decomposição de materiais orgânicos em meio anaeróbio (CONRAD, 2005; COSTA et al., 2008a), mediada por micro-organismos metanogênicos, especialmente bactérias. As principais vias de produção de CH_4 em solos alagados envolvem a redução do CO_2 por meio de hidrogênio molecular (Reação 1) e a clivagem do acetato (Reação 2), que é a principal via, podendo responder por até 80% do total de CH_4 produzido (DUBEY, 2005).



A formação de CH_4 nos solos ocorre devido à decomposição predominantemente anaeróbia de compostos orgânicos complexos em formas mais simples (PONNAMPERUMA, 1972), pela ação de diferentes grupos de micro-organismos (LE MER & ROGER, 2001). Segundo Silva et al. (2008), a produção de CH_4 segue a sequência das seguintes reações: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese.

No início do processo ocorre a hidrólise de polímeros biológicos em monômeros (carboidratos em açúcares, lipídios em ácidos orgânicos de cadeia longa e proteínas em aminoácidos), por meio de micro-organismos anaeróbios facultativos ou obrigatórios, que excretam enzimas extracelulares, transformando os compostos de cadeia complexa em compostos de cadeia simples.

Em seguida da hidrólise, ocorre a acidogênese, etapa na qual os compostos orgânicos de cadeia simples são assimilados por micro-organismos anaeróbios facultativos ou obrigatórios e fermentados intracelularmente para ácidos orgânicos de cadeia simples, tais como acético, propiônico e butírico.

Na sequência da acidogênese, ocorre a acetogênese, onde há a produção de ácido acético a partir de ácidos orgânicos com mais de dois carbonos. Essa produção ocorre a partir de micro-organismos anaeróbios obrigatórios (bactérias acetogênicas) que fazem parte de um grupo metabólico intermediário que produz substrato para as bactérias metanogênicas.

Ao final da degradação ocorre a metanogênese, que é a formação do CH_4 a partir de compostos simples gerados pela acetogênese, bem como outros, como formato, H_2 , metanol, metil, aminas e CO_2 . A metanogênese requer condições anaeróbicas, sendo restrita a micro-organismos anaeróbios obrigatórios.

Em relação à produção de N_2O , em sistemas de cultivo de arroz irrigado, poucas informações são encontradas na literatura, mas sabe-se que em muitos estudos a adição de adubos nitrogenados e a drenagem do solo na safra de cultivo aumentam sua produção (ROSA et al., 2011). Já na entressafra, num estudo realizado por Souza (2013), a antecipação do preparo do solo, com incorporação da palha do arroz pós-colheita com grade ou cultivo de azevém pós-colheita promoveu as menores emissões de N_2O durante o período de entressafra, que naquele estudo foi responsável por praticamente 100% das emissões de N_2O comparado ao período de cultivo do arroz.

O N_2O é formado sob condições mais oxidadas ($\text{Eh} > 200 \text{ mV}$) em relação ao CH_4 ($\text{Eh} < -100 \text{ mV}$) e os principais processos responsáveis pela produção e emissão de N_2O são a nitrificação e a desnitrificação (LIU et al., 2010). Ambos os processos são influenciados por condições físicas (difusão de O_2 e temperatura do solo), químicas (concentração de amônio e disponibilidade de C facilmente metabolizável) e biológicas do solo (atividade microbiana) (COSTA et al., 2008a). A produção de N_2O por nitrificação é maximizada por condições de umidade no solo na faixa de 35-60% do espaço poroso preenchido por água (PPA), enquanto a desnitrificação, que é um processo anaeróbio, é favorecida por PPA superior a 70%, sendo considerado o processo predominante na emissão de N_2O dos solos (COSTA et al., 2008a).

2.3 A Emissão de Metano e de Óxido Nitroso

A produção e emissão de CH_4 nos solos ocorrem devido à decomposição predominantemente anaeróbia de compostos orgânicos (PONNAMPERUMA, 1972), como é o caso de áreas de banhado e de lavouras de arroz irrigado, que permanecem inundadas durante longos períodos. A estimativa mundial é de que a produção de arroz irrigado por inundação seja responsável por 10-40% das emissões de CH_4 (KASTERINE e VANZETTI, 2010). A emissão de CH_4 do solo para a atmosfera é um equilíbrio entre a oxidação do CH_4 , produção e transporte no interior do sistema solo (BRADFORD et al, 2001). O CH_4 e o N_2O são liberados do ambiente anaeróbio para a atmosfera por três mecanismos principais: ebulição, difusão e liberação através do aerênquima das plantas.

A ebulição ocorre quando o CH_4 escapa do interior do solo para a atmosfera, por meio da formação de bolhas de gás. Já a difusão é um movimento por diferença de concentração, pelo qual o CH_4 e o N_2O são liberados por difusão através do solo e da lâmina de água. O mecanismo de liberação dos gases de maior importância se dá através do aerênquima das plantas de arroz, no qual o CH_4 e o N_2O entram pelas raízes e são liberados na parte aérea.

A ebulição surge quando há aumento da pressão devido à contínua produção de gases no solos, em conjunto com o comprometimento de trocas gasosas, devido à sua inundação. Os gases presos são posteriormente liberados de forma irregular do solo, na forma de bolhas.

Um grande número de plantas de zonas úmidas desenvolveram sistemas de adaptação para sobreviver e se desenvolver em ambientes anóxicos. O mais básico deles é o aerênquima, o qual permite que macrófitas aquáticas procedam trocas de gases entre a atmosfera e sedimentos (SEBACHER et al., 1985). Em torno de 90% do transporte de CH_4 do solo para a atmosfera em arrozais e pântanos de água doce se dá através da porção aerênquima das raízes e caules das plantas. Os gases (CH_4 e N_2O) são transportados para a atmosfera de acordo com seu gradiente de concentração (YU et al., 1997), sendo que o fluxo de CH_4 por meio de transportes vascular, está relacionado com as condições redox do solo em que a planta cresce.

O mecanismo de difusão de CH_4 para a atmosfera não parece ser tão importante quanto a ebulição ou transporte vascular, para as emissões líquidas. Parece haver duas razões principais para isto: 1) a difusão dos gases na água é mais lenta do

que no ar por um fator de 10^4 ; e 2) os gases devem passar através da fina interface aeróbia do solo onde ocorre a oxidação do CH_4 (REDDY & DELAUNE, 2008).

A camada superficial de um solo alagado e a rizosfera das plantas são zonas oxidadas. Assim, foram identificadas como sendo importantes na regulação do fluxo de CH_4 , pois uma quantidade significativa de CH_4 (cerca de 75%) produzido em terras baixas é oxidada nestas duas zonas antes de escapar do solo para a atmosfera (REDDY & DELAUNE, 2008).

2.4 Fatores Ambientais que Afetam a Liberação de Metano e de Óxido Nitroso em Lavouras de Arroz Irrigado

2.4.1 Estoque de Carbono

Na agricultura, a mitigação do aquecimento global pode ser promovida através da diminuição das emissões e/ou aumento do influxo de carbono (C) nos agroecossistemas, através da adoção de práticas de manejo que promovam a recuperação de solos degradados e aumentem o armazenamento de C orgânico no solo. Da mesma forma, a manutenção de teores suficientes de matéria orgânica do solo (MOS), cujo principal componente é o C, é crucial para o funcionamento biológico, químico e físico do solo, determinando seu potencial produtivo.

As práticas agrícolas, nos diferentes sistemas de manejo, influenciam a dinâmica dos compartimentos de C no sistema planta-solo-atmosfera. O entendimento dessas práticas e processos reguladores nos diferentes sistemas assume importância, pois permite inferir no estoque de C no solo, nos fluxos de CO_2 e de CH_4 para a atmosfera e na ciclagem de nutrientes, especialmente do nitrogênio (N), do enxofre (S) e do fósforo (P), fundamentais para o desenvolvimento adequado e potencial produtivo das culturas. Assim, é possível identificar práticas agrícolas mais apropriadas para aumentar o estoque de C do solo, favorecer os processos agronômicos do cultivo de plantas, bem como minimizar a participação da agricultura nas mudanças climáticas globais (BAYER & MIELNICZUK, 2008).

Assim, o sistema plantio direto (PD), por reduzir a mobilização do solo, e associado ao uso de plantas de cobertura de solo e a rotação de culturas tem apresentado balanço positivo de carbono em solos tropicais e subtropicais no Brasil (AMADO et al., 2006). Porém, de forma simplificada, para que o solo atue como um dreno de C são necessárias elevadas adições de C via resíduos vegetais a qual deve ser complementada pela atuação de mecanismos que estabilizem o C adicionado na forma de MOS.

Segundo Christensen (1996), a estabilização do C no solo depende de três mecanismos principais: 1) Estabilização bioquímica (ou recalcitrância), 2) Estabilização química e 3) Proteção física. A estabilização bioquímica depende das características intrínsecas do substrato, tais como teores de lignina, celulose e relação C/N, assim como da presença de grupamentos funcionais de C aromáticos e alifáticos de cadeia longa que conferem resistência à decomposição biológica. A estabilização química está relacionada a ligações entre os compostos orgânicos e as frações minerais do solo (proteção coloidal), que de acordo com a complexidade química dos compostos organo-minerais irá determinar a velocidade de decomposição do C armazenado no solo. A estabilidade física depende da estrutura do solo, especialmente dos agregados, que limitam o acesso dos micro-organismos aos compostos orgânicos. A menor difusão do oxigênio no interior dos agregados e a proteção do C a ação das enzimas dos micro-organismos têm sido apontadas como determinantes deste mecanismo. A proteção estrutural é ainda dependente da formação, tamanho e estabilidade dos agregados no solo. Assim, à medida que aumenta o tamanho dos agregados há um incremento do estoque de C protegido no interior destes.

Um levantamento com várias amostras de solos de terras baixas no RS, realizado por Anghinoni et al. (2004) evidenciou que, nas regiões arrozeiras, predominaram solos arenosos (com 11 a 25% de argila) e muito arenosos ($\leq 10\%$ argila), atingindo 96,5% do total das amostras avaliadas. Como já é bem conhecido o papel das partículas minerais do solo na proteção do C contra a decomposição microbiana, fica evidente que os solos amostrados nesse levantamento apresentam baixa capacidade de proteger o C, favorecendo a ocorrência de amostras com baixo teor de matéria orgânica. E alguns outros fatores que favorecem a decomposição mais rápida da matéria orgânica podem ocorrer em solos alagados, especialmente quando cultivados com arroz, tais como: pH neutro, baixa densidade do solo, solos intensamente preparados a cada cultivo, suprimento de O₂ para a camada reduzida e elevada disponibilidade de nutrientes (SOUSA, 2001).

Atualmente, uma parcela significativa da área semeada com a cultura do arroz irrigado no RS está sendo cultivada com os sistemas de cultivo mínimo e plantio direto, os quais utilizam cobertura vegetal durante o inverno e um menor revolvimento para o preparo (SOSBAI, 2014). A redução ou a eliminação de operações que mobilizam o solo tende a diminuir a taxa de decomposição da matéria orgânica e a introdução de

espécies de cobertura aumenta o aporte de resíduos vegetais ao solo. Esse cenário aponta para um incremento dos estoques de carbono nesses solos (SILVA, 2008).

Já em áreas naturais de terras baixas os estoques de C normalmente são mais elevados comparado às áreas cultivadas, devido ao acúmulo de material orgânico, essas áreas normalmente são mais baixas na paisagem com o lençol freático próximo a superfície, onde o solo não tem capacidade de drenar o influxo de água de áreas adjacentes mais altas. Em solo predominantemente anaeróbico e que não sofre revolvimento, o estoque de C orgânico tende a ser maior do que em solo aeróbico, visto que a decomposição de muitos tipos de compostos orgânicos é limitada pelo ambiente reduzido, especialmente àqueles aromáticos como a lignina (OLK & SENESI, 2000). Micro-organismos anaeróbicos, de modo geral, são menos eficientes em termos de decomposição do que os organismos aeróbicos. Além disso, fungos e actinomicetos, grupos de organismos com capacidade de degradar frações orgânicas mais recalcitrantes, como a lignina, são aeróbicos obrigatórios (CONRAD, 2005).

2.4.2 Temperatura e Radiação Solar

A metanogênese normalmente atinge seu ápice numa faixa de temperatura que varia de 30 até 40 °C. Por outro lado, a ocorrência de baixas temperaturas no solo tende a reduzir a produção de CH₄ pela diminuição da atividade dos micro-organismos metanogênicos e também das bactérias responsáveis pela fermentação (LE MER & ROGER, 2001). Yang e Chang (1998), avaliando em laboratório o efeito de diversos fatores sobre a produção de CH₄ em um solo de terras baixas, observaram que a taxa de produção de CH₄ aumentou a partir de uma temperatura de incubação de 25 °C, sendo indiferente a temperaturas inferiores.

A dependência da temperatura na produção de CH₄ tem sido observada em vários outros estudos. Na Itália observou-se que os fluxos de CH₄ são dependentes da temperatura a 5 cm de profundidade, sendo que as emissões dobraram quando a temperatura foi de 20 para 25°C (HOLZAPFEL-PSCHORN et al, 1986). Na Índia encontrou-se que os fluxos de CH₄ aumentaram quando a temperatura do solo aumentou até 35°C, mas as emissões diminuíram após essa temperatura. No Brasil Costa (2005) encontrou correlação entre as variações no efluxo de CH₄ do solo eg as variações da temperatura do solo e da radiação solar em dois sistemas de cultivo: plantio direto (PD) e plantio convencional (PC), que de forma associada, explicaram 65 % ($p < 0,001$) e 90 % ($p < 0,0001$) das variações no efluxo de CH₄ do solo em PC e PD, respectivamente.

Pois a temperatura do solo aumenta a atividade microbiana, e consequentemente, a decomposição de compostos orgânicos do solo, aumentando o fornecimento de substratos para os organismos metanogênicos. Já a radiação aumenta a taxa fotossintética das plantas, resultando em maior massa na parte aérea e de raízes, aumentando a liberação de exsudatos e assim, aumentando a disponibilidade de C para a metanogênese (COSTA, 2005).

A importância da temperatura (ar e solo) na produção e na emissão de CH_4 do solo é ressaltada ao se avaliar as emissões de CH_4 durante o período de 24 horas. As taxas de emissão de CH_4 em áreas cultivadas com arroz irrigado normalmente aumentam após o amanhecer, atingindo o pico máximo de emissão no início da tarde, e entram em declínio durante a noite (COSTA, 2005). Neue et al. (1997) afirmam que este processo se deve às mudanças de temperatura da solução e de pressão do CH_4 no solo, e que fatores como intensidade de luz (fotossíntese, respiração) e umidade do ar (transpiração) não interferem na emissão de CH_4 .

No caso do N_2O , as alterações na temperatura incidem diretamente sobre o metabolismo microbiano envolvido nos processos de nitrificação e desnitrificação (AULAKH et al., 2001; IIDA et al., 2007). O aumento da temperatura do solo normalmente intensifica a atividade das bactérias desnitrificadoras, resultando no aumento das emissões de N_2O do solo (IIDA et al., 2007). Mesmo quando as condições do solo (teor de água, NO_3^- e C) são propícias para os micro-organismos nitrificadores e desnitrificadores, as baixas temperaturas do ar e do solo podem impedir as emissões de N_2O (AULAKH et al., 2001).

Por outro lado, resultados contrários também podem ser verificados, como os de Hou et al. (2000), que constataram um incremento nas emissões de N_2O do solo sob temperaturas mais baixas. Nesse caso, tais resultados podem estar associados à adaptação dos micro-organismos às diferentes condições térmicas, conforme sugerem Aulakh et al. (2001). Zschornack (2011) também observou uma correlação negativa entre a taxa de emissão de N_2O e a temperatura do solo, similar à encontrada por Davidsson & Leonardson (1997), cujo aumento na temperatura do solo resultou na diminuição das emissões de N_2O do solo, especialmente no solo drenado.

A radiação solar pode exercer pouca influência sobre a produção e a emissão de CH_4 do solo (YANG & CHANG, 1998). Porém, a radiação solar influencia a taxa fotossintética das plantas, a qual determina a sua produção de matéria seca e, consequentemente, a liberação de compostos orgânicos pelas raízes das plantas

(AULAKH et al., 2001). Assim, a redução na radiação solar pode diminuir as emissões de CH_4 , pois a produção de biomassa e de CH_4 são proporcionais à quantidade de radiação recebida pelas plantas (SASS & CICERONE, 2002). Por outro lado, a radiação solar pode incentivar o crescimento de algas e cianobactérias, as quais podem produzir O_2 durante o dia e estimular a oxidação de CH_4 pela disponibilização de O_2 para as bactérias metanotróficas. As informações disponíveis sobre a emissão de N_2O e a radiação solar são ainda pouco conhecidas. Sherlock et al. (2002) encontraram uma correlação positiva entre a radiação solar e a emissão de N_2O em um solo sob pastagem após aplicação de dejetos suíno. Os autores justificaram tal resultado pela diminuição da solubilidade do N_2O na solução do solo, porém, não descartaram a hipótese de que esse aumento foi ocasionado também pela elevação da temperatura.

2.5 Influência de Práticas de Manejo na Emissão de GEE em Sistemas de Cultivo de Arroz Irrigado

Estimativas apontaram que reduções de 10 a 15% no total das emissões antrópicas de CH_4 poderiam estabilizar sua concentração na atmosfera (IPCC, 1995). Na cultura do arroz, esta redução na emissão deve ser conseguida, principalmente, pelo uso de cultivares que emitam menor quantidade de CH_4 , de fertilizantes que não estimulem a produção do gás, pelo manejo intermitente da água de irrigação, pela utilização de sistemas de cultivo que apresentem menores emissões de GEE e/ou também pela diversificação de culturas em terras baixas, pois o cultivo de culturas de sequeiro normalmente já reduz as emissões de GEE.

2.5.1 Variedades

Diversos trabalhos encontrados na literatura relatam a existência de variabilidade entre cultivares de arroz quanto à emissão de CH_4 (SUBADIYASA et al., 1997; MÜLLER et al., 2011). Para a maioria das cultivares, a maior taxa de emissão de CH_4 é verificada na fase reprodutiva, estando relacionada com o aumento de exsudatos da raiz que servem como substrato para as bactérias metanogênicas (RUSCHEL, 1992), e à época em que ocorre o completo desenvolvimento dos aerênquimas (AULAKH et al., 2000).

As características morfológicas das plantas de arroz apresentam respostas variadas em relação à emissão de CH_4 . Müller et al. (2011) observaram correlações

positivas entre o efluxo de CH_4 e a produção de matéria seca de plantas de arroz e também com a estatura das plantas. Singh et al. (1999) observaram correlações positivas entre a taxa de emissão de CH_4 e o número de afilhos, o volume e a porosidade de raízes e a produtividade de grãos.

2.5.2 Fertilizantes

A adubação inorgânica, especialmente a nitrogenada, é uma das práticas de maior relevância na cultura do arroz irrigado visando atingir altas produtividades. Os efeitos do uso de fertilizantes nitrogenados sobre a emissão de CH_4 são complexos e muitas vezes contraditórios, ainda mais que eles dependem do tipo de fertilizante e da quantidade aplicada (LE MER & ROGER, 2001). Por outro lado, os fluxos de N_2O pelo uso de adubos nitrogenados têm sido amplamente estudados e os resultados têm mostrado um aumento nas emissões do gás, quando da aplicação desses fertilizantes (PANDEY et al., 2014).

O uso de adubos nitrogenados na cultura do arroz irrigado, principalmente de ureia, resulta em estímulo à produção de CH_4 , por favorecer o desenvolvimento das plantas de arroz (LINDAU et al., 1993; LE MER & ROGER, 2001), disponibilizando mais C via raízes para as bactérias metanogênicas (SCHIMEL, 2000; CAI et al., 2007). A diminuição da oxidação do CH_4 , por meio da inibição competitiva envolvendo as enzimas responsáveis pela oxidação do CH_4 (metano monooxigenase), também aumenta a emissão de CH_4 . Segundo Schimel (2000), as moléculas de CH_4 e de NH_4^+ apresentam tamanho e estrutura similares e, por essa razão, tais enzimas podem utilizar o NH_4^+ como substrato preferencial, repercutindo no aumento do fluxo do CH_4 para a atmosfera.

Entretanto, trabalhos têm demonstrado que o emprego de fertilizantes nitrogenados nas lavouras de arroz também podem contribuir para a redução das emissões de CH_4 (BRONSON et al., 1997; YANG & SHANG, 1998). O uso de adubos amoniacais pode estimular o crescimento e a atividade das bactérias metanotróficas, resultando em substancial redução do CH_4 (BODELIER et al., 2000), diferentemente do que afirma Schimel (2000).

Aplicações de sulfato de amônio e de uréia nas doses de 100 e 300 kg ha⁻¹ resultaram em reduções nas emissões de CH_4 de 42 e 60% e 7 e 14%, respectivamente, comparativamente à não aplicação (CAI et al., 1997). A variação observada entre as duas formas nitrogenadas pode ser explicada pelo fato do íon amônio competir com o

CH₄ para ser oxidado pelos organismos metanotróficos, aumentando a produção de CH₄; enquanto, o íon sulfato atua como um aceptor de prótons em condições anaeróbicas, reduzindo a produção de CH₄. Por sua vez, Yang & Chang (1998) verificaram que a produção de CH₄ é reduzida e atrasada com aplicação de adubo nitrogenado em doses superiores a 600 kg de fertilizante ha⁻¹.

Apesar dos efeitos do uso de fertilizantes nitrogenados sobre a emissão de CH₄ não estarem bem esclarecidos, quando se trata da emissão de N₂O estudos têm observado que o aumento nas doses aplicadas de N geralmente resulta no incremento das emissões de N₂O do solo (CAI et al., 1997). As perdas de N via N₂O em solos cultivados com arroz geralmente são baixas, mesmo com o uso de fertilizantes nitrogenados. Todavia, elas podem ser potencializadas em situações que favoreçam a sua formação no solo, como por exemplo, a realização de drenagens. É provável que neste caso, ocorram alternância das condições de oxidação/redução, promovendo alternância dos processos de nitrificação e desnitrificação e com isso se intensificando a produção e emissão de N₂O.

2.5.3 Manejo da Água

O sistema de manejo da água amplamente utilizado nas lavouras orizícolas da Região Sul do país tem como principal característica a utilização de lâmina de água contínua para irrigação. Esse sistema se caracteriza por um elevado uso de água e baixa eficiência (CORREA et al., 1997). A razão da utilização da irrigação por inundação contínua é em função de alguns benefícios que asseguram altas produtividades para a cultura neste tipo de manejo, tais como maior facilidade no manejo da água (STONE, 2005), o controle da temperatura proporcionada pela lâmina de água sobre o solo (SOSBAI, 2012), aumento na disponibilidade de nutrientes (PONNAMPERUMA, 1972) e o controle eficiente de plantas daninhas (CORREA et al., 1997). Por outro lado, características como elevadas perdas de água por evaporação, fluxo lateral, percolação e escoamento superficial de água no solo tornam o sistema como sendo de elevado consumo de água e de baixa eficiência, já que necessitam de grandes volumes de água por tonelada de grãos produzido (STONE, 2005).

A irrigação contínua é conceitualmente definida como aquela em que a cultura permanece com uma lâmina de água sobre a superfície do solo durante quase todo o ciclo da cultura, que varia em média de 80 a 100 dias. O início da irrigação ocorre entre 15 a 20 dias após a emergência das plântulas e se estende até a maioria dos grãos

atingirem o estado pastoso, que deve ocorrer de 10 a 15 dias antes da colheita (SOSBAI, 2014). A manutenção da lâmina de água, por outro lado, cria condições estritamente anaeróbias e a produção de CH_4 é favorecida por meio da atividade metabólica de micro-organismos metanogênicos (REDDY, 2015), mas esse ambiente pode restringir as emissões de N_2O (TOWPRAYOON et al., 2005). Sob condições prolongadas de alagamento, o N_2O presente no solo pode ser biologicamente reduzido a N_2 (REDDY & DELAUNE, 2008), o que contribui, inclusive, para a mitigação das emissões de N_2O do solo.

O sistema intermitente, no qual são realizadas duas ou três entradas de água durante o ciclo de desenvolvimento do arroz, é utilizado em alguns países tradicionais de cultivo de arroz, pois normalmente resulta em benefícios para as plantas, repercutindo positivamente sobre sua produtividade (MINAMIKAWA & SAKAI, 2005) e também na mitigação das emissões de CH_4 . Porém, embora a supressão da água promova uma redução na emissão de CH_4 , ela pode intensificar as emissões de N_2O do solo (WESZ et al., 2011).

O manejo da água mantendo o solo entre uma condição de saturação e a existência de uma fina lâmina de água vem ao encontro dos manejos com alagamento intermitente no sentido de aumentar a eficiência no uso da água na cultura do arroz. No entanto, as emissões de CH_4 e N_2O podem ser influenciadas de forma diferenciada por esta condição hídrica. O não estabelecimento de uma lâmina considerável de água sobre o solo pode não proporcionar as condições anaeróbias que favoreçam a metanogênese, ou então retardá-las. Por outro lado, as emissões de N_2O tornam-se maiores em virtude das condições favoráveis a ciclos de nitrificação e desnitrificação durante o cultivo (LIU et al., 2010), bem como pela liberação do N_2O aprisionado no solo por ocasião da inundação (AULAKH et al., 2001).

Existe também, outro método de irrigação que ainda não está consolidado e que também vem ao encontro dos demais manejos que visam aumentar a eficiência no uso da água na cultura do arroz, sendo esse, um manejo de água que retarda a entrada de água e antecipa a supressão da lâmina de água, chamado de irrigação com período reduzido. Nesse manejo de água a irrigação por inundação é iniciada quando as plantas de arroz se encontram no estágio de seis folhas (V6) e mantido com lâmina até o estágio R7. No entanto, as emissões de CH_4 e N_2O também podem ser influenciadas de forma diferenciada por esta condição hídrica.

O tipo de irrigação realizado no cultivo do arroz também tem reflexos diretos sobre o comportamento eletroquímico do solo (RATERING & CONRAD, 1998), influenciando significativamente a produção e a emissão de GEE. No manejo com inundação contínua, mantém-se o solo reduzido durante quase todo o ciclo da cultura, o que favorece a emissão do CH_4 , enquanto que o sistema de irrigação por inundação intermitente promove a reoxidação do solo, diminuindo a produção de CH_4 (ZSCHORNACK, 2011).

O manejo da irrigação pode afetar o potencial produtivo da cultura, seu ciclo, aumentar ou diminuir a toxidez do Fe^{+2} e diminuir o estresse em decorrência das altas temperaturas (SOSBAI, 2012). Santos et al. (1999) encontraram maior produtividade na irrigação contínua comparada com a irrigação intermitente, associada às diferenças no perfilhamento e nas épocas de florescimento entre os manejos da irrigação. Por outro lado, Mezzomo (2009) não encontrou diferenças na produtividade do arroz utilizando os dois tipos de irrigação (Inundação Contínua e Intermitente); no entanto, a irrigação intermitente apresentou a vantagem na economia de água e causou a diminuição de 25% da emissão de CH_4 em uma das safras avaliadas (BRITZKE et al., 2008). No ponto de vista do potencial de emissão de CH_4 , Cai et al. (1997) encontraram uma emissão de CH_4 18% menor, com apenas uma supressão de três dias durante o ciclo da cultura, e Sass et al. (1992) com apenas uma supressão de dois dias durante o ciclo da cultura diminuiu em 50% a emissão de CH_4 . Por outro lado, a irrigação intermitente pode aumentar a emissão de N_2O (JOHNSON-BEEBOUT et al., 2009), pois permite o processo de nitrificação do NH_4^+ passando a NO_3^- quando o solo encontra-se oxidado, que ao sofrer o realagamento, é perdido por denitrificação. Itoh et al. (2011) não encontraram aumento no efluxo de N_2O com a utilização da irrigação por inundação intermitente no período do perfilhamento da cultura, provavelmente pela baixa disponibilidade de N no solo durante este período.

A relação entre a quantidade de água no solo e a emissão de CH_4 tem sido objeto de estudo por diversos autores em diferentes regiões produtoras de arroz no mundo. Na China, Yang e Chang (1998) encontraram que valores inferiores a 23% de água no solo, a emissão de CH_4 é insignificante, enquanto que as taxas máximas de emissão de CH_4 ocorreram com umidades superiores a 67% de água no solo. Esses autores estabeleceram a estratégia do controle do potencial redox, utilizando o manejo da água de irrigação. No entanto, esse sistema de controle do potencial redox é difícil de

ser realizado em áreas de cultivo a campo, devido às limitações no controle dos fatores que afetam o suprimento de água e oxigênio no sistema.

A irrigação intermitente pode variar quanto ao grau de umidade do solo com que é reiniciada. Essa pode ser reiniciada ainda com o solo saturado, ser reiniciada com o solo na capacidade de campo ou ainda com o conteúdo de água no solo inferior a capacidade de campo. Dependendo do grau de umidade do solo em que ocorre o realagamento, pode-se ter efeitos diferentes sobre intensidade de redução do solo. Se o realagamento for realizado com o solo ainda saturado, sem apresentar uma lâmina de água, esse manejo não terá efeito significativo sobre a intensidade de redução do solo. Se o realagamento for realizado em uma condição em que o solo estiver com umidade na capacidade de campo, esse manejo irá favorecer a entrada de oxigênio no solo durante a intermitência e diminuir os efeitos da redução do solo durante o ciclo da cultura. É o ponto de realagamento que o manejo da irrigação intermitente pode influenciar a emissão de CH_4 , pois as alterações eletroquímicas na solução do solo neste período que irão afetar a produção do CH_4 . Yu & Patrick (2004) alertaram para a necessidade de se controlar o manejo da irrigação, com drenagens, utilizando o Eh do solo como forma de mitigar a emissão de CH_4 e N_2O .

Atualmente, na busca por economia no uso da água na lavoura orízicola produtores da Fronteira Oeste do Rio Grande do Sul, região onde há menor disponibilidade hídrica quando comparada à região orízicola do Sul do estado, e por conta do relevo mais ondulado o uso de água para irrigação por inundação do arroz é maior, começaram a utilizar a irrigação por aspersão. O uso de água observado, no sistema de pivô central segundo estimativas dos produtores, situa-se em torno de 400 mm por ciclo, enquanto nesse ambiente o sistema de inundação utiliza mais do que o dobro dessa quantidade. O aumento da eficiência do uso da água por si só representa uma grande vantagem do sistema, podendo, por exemplo, ser quase triplicada a área irrigada num sistema de produção arroz-soja, utilizando-se o mesmo volume de água que no sistema de irrigação por inundação contínua no arroz (PINTO, 2015). A economia no uso da água deste método foi significativa e o método mostrou-se viável economicamente. Isso tem incentivado a expansão deste método de irrigação para lavouras de outras partes do estado, como, por exemplo, para as áreas de terras baixas da região Sul.

A adoção da aspersão como método de irrigação na cultura do arroz apresenta outras vantagens adicionais como a adoção do plantio direto como sistema de cultivo

com rotação de culturas. Em áreas de cultivo de arroz sob inundação, a adoção tanto de sistemas de rotação de culturas como de plantio direto são seriamente limitados (BAMBERG et al., 2009) em decorrência do uso de áreas de baixada naturalmente mais úmidas ou que mantêm a umidade no solo por mais tempo e ao mesmo tempo a necessidade da manutenção de lâmina de água na lavoura de arroz faz com que sistemas que possibilitem a drenagem eficiente das áreas em anos que o arroz não é cultivado não sejam implantados de maneira adequada (SILVA & PARFITT, 2004); além disso, a existência de taipas remanescentes do cultivo anterior torna as áreas úmidas limitadas para a implantação de rotação de culturas.

A irrigação por meio de pivô central, apesar de não ser uma tecnologia muito barata para ser implementada, tem várias vantagens em relação à inundação contínua, por exemplo, além da redução do uso da água ao redor de 40 a 50% (CONCENÇO et al., 2009), também mantém o solo na maior parte do tempo em condições aeróbicas, o que pode diminuir as emissões de CH_4 . Mas esse sistema poderá favorecer as emissões de N_2O , pois é provável que haja uma alternância das condições de oxidação/redução, favorecendo os processos alternados de nitrificação e desnitrificação, intensificando a produção e a emissão de N_2O .

2.5.4 Sistemas de Cultivo

Atualmente no estado do RS os principais sistemas de cultivo, praticados em áreas de terras baixas são: o cultivo mínimo com semeadura direta, o sistema convencional, o plantio direto e o sistema pré-germinado (SOSBAI, 2014). Segundo o IRGA (2016) na safra 2013/14 no Rio Grande do Sul, predominou o cultivo sem revolvimento para semeadura imediata (reunindo cultivo mínimo com preparo antecipado e semeadura direta) (74,2% da área), seguido dos sistemas convencional (15,7% da área) e pré-germinado (10,1%).

O **Sistema convencional** de preparo de solo é utilizado no Rio Grande do Sul em aproximadamente 15% da área e, consiste no preparo e aplainamento superficial do solo, eliminação das plantas daninhas e a incorporação dos resíduos de culturas no solo poucos dias antes da semeadura, criando um ambiente favorável à emergência e ao desenvolvimento inicial das plantas de arroz. SCHIMEL et al., 1993 e COSTA et al., 2008a, verificaram que a incorporação do resíduo vegetal aumentou as emissões de CH_4 no solo sob preparo convencional (PC) em sistema de produção de arroz irrigado. Os autores relacionaram a incorporação dos resíduos vegetais ao solo e o aumento da área

de contato entre os resíduos em camadas subsuperficiais, com a facilitação da ação dos micro-organismos e atividade metanogênica.

A incorporação de resíduos aumenta a área superficial suscetível à ação dos micro-organismos responsáveis pela sua decomposição e promove a liberação de compostos orgânicos para a metanogênese (SCHIMEL et al., 1993; COSTA et al., 2008a; BAYER et al., 2014), além de acelerar o processo de redução do solo. Com a incorporação dos resíduos ao solo, é provável que grande parte do N_2O formado pela desnitrificação durante o alagamento seja reduzido a N_2 no solo, pois as condições primordiais para a ocorrência desse processo (alta redução, C disponível, ausência de O_2) são atendidas.

O **Cultivo mínimo com semeadura direta** atualmente é o sistema mais utilizado no RS, no qual as operações de preparo do solo tanto podem ser realizadas desde o verão anterior até o início da primavera sendo, neste último caso, com uma antecedência mínima que permita a formação de uma cobertura vegetal (SOSBAI, 2014). O preparo antecipado do solo visa corrigir pequenas imperfeições de microrrelevo, preparar a superfície do solo para a semeadura e estimular a emergência de plantas daninhas antes da instalação da cultura do arroz (GOMES et al., 2004). A semeadura é realizada diretamente sobre a cobertura vegetal previamente dessecada com herbicida, com mobilização do solo apenas na linha de semeadura ocorrendo, com isso, menor incidência de plantas daninhas.

No cultivo mínimo o preparo do solo ocorre num período no qual o solo normalmente não se encontra saturado, fazendo com que grande parte do material orgânico incorporado seja decomposto em ambiente aeróbio, ou seja, o carbono é oxidado a CO_2 , o que não ocorreria se fosse decomposto em ambiente anaeróbio (sendo daí reduzido para CH_4). O CO_2 , por sua vez apresenta um potencial de aquecimento de aproximadamente 25 vezes menor do que o CH_4 , sendo assim, ocorrerá uma mitigação nas emissões dos GEE do solo.

As emissões de N_2O apresentadas por Kaewpradit et al. (2008) após incorporação de resíduos de amendoim e de arroz ao solo (em diferentes combinações de mistura) dois meses antes do transplante do arroz foram influenciadas pela qualidade do resíduo, mesmo passadas 15 semanas de sua incorporação, quando o arroz já se encontrava em estágio adiantado de desenvolvimento. Souza et al. (2011) verificaram que a incorporação da palha logo após a colheita do arroz reduz a quantidade anual de CH_4 emitido em uma lavoura de arroz em área de terras baixas,

pois neste caso a maior parte da palha é decomposta no período de entressafra, diminuindo a disponibilidade de substrato no período de alagamento.

Portanto, a época em que o solo é preparado, a quantidade e a qualidade dos resíduos aportados, aliado às condições climáticas, determinam a produção e a emissão de CH_4 e de N_2O durante o cultivo do arroz, principalmente em sua fase inicial de desenvolvimento.

O **Plantio direto** é utilizado em cerca de 5% da área cultivada com arroz no RS e fundamenta-se em três princípios básicos: movimentação mínima do solo, permanente cobertura do solo e adoção da prática de rotação e sucessão de culturas. Nesse sistema ocorre a aplicação superficial de resíduos vegetais, havendo menor área de contato dos resíduos com o solo, limitando a colonização microbiana e, portanto, a decomposição dos resíduos. Em decorrência, tem-se menor quantidade de compostos orgânicos para a metanogênese. Por outro lado, a manutenção de resíduos vegetais sobre a superfície do solo em sistemas de produção de arroz irrigado sob plantio direto (PD) pode resultar na maior formação de CO_2 do que CH_4 durante a decomposição da biomassa vegetal (BAYER et al., 2014). A camada superficial de palha em PD pode desencadear zonas mais oxidadas, reduzir a atividade microbiana metanogênica e consequentemente aumentar a atividade de micro-organismos metanotróficos (LE MER e ROGER, 2001).

Além disso, é esperado que as raízes do arroz sejam mais superficiais em solo não preparado, reduzindo o volume de solo explorado, pois essas localizam-se em zonas menos reduzidas, com valores de Eh mais altos. Por outro lado, o maior estoque de matéria orgânica (BAYER et al., 2006) e o aumento da população de desnitrificadores dos solos em plantio direto representam maior potencial para mineralização de N e C, e emissão de N_2O .

2.5.5 Umidade do Solo no momento da Colheita do Arroz

Atualmente, no Rio Grande do Sul a maioria das áreas de terras baixas cultivadas com arroz irrigado são manejadas no outono logo após a colheita, diferente do sistema tradicional onde o preparo das áreas é realizado nos meses de agosto/setembro antecedendo a semeadura da cultura. Na realização do preparo antecipado (logo após a colheita) também podem ocorrer dificuldades no preparo do solo, as quais estão associadas, em grande parte, à condição de umidade do solo por ocasião da colheita do arroz (seco, saturado ou em presença de lâmina de água), da

grande quantidade de palha (geralmente superior a 18 t ha^{-1}) e do clima chuvoso pós-colheita no outono-inverno.

Segundo Massoni et al., (2013), quando se adotam implementos que incorporam a palha de arroz superficialmente (em torno de 3 cm), como é o caso do rolo-faca, o efeito sobre a fisiologia das sementes das daninhas pode ser grande. Quando esses autores realizaram o preparo logo após a colheita (preparo após a colheita com solo alagado), encontraram um comportamento quadrático na redução da dormência das sementes de daninhas (arroz vermelho), tornando-as inviáveis a partir dos 120 dias após a colheita do arroz e estimulando o surgimento de plântulas, além de permitir o preparo antecipado da área.

O manejo pós-colheita possibilita a antecipação do preparo do solo, permitindo que a semeadura da cultura ocorra na época recomendada, além da distribuição das atividades mecanizadas e custos ao longo do ano. Uma forma de contornar os problemas de excesso de umidade do solo após a colheita do arroz é preparar o solo com o rolo-faca.

O rolo-faca facilita o preparo da área para a repetição do cultivo do arroz, permite a implantação de outros cultivos ou de pastagens, ainda no outono, e consome menos combustível que o preparo convencional. No entanto, a época e a forma de manejo dos resíduos culturais (rolo-faca, grade ou pousio) podem ter implicações diferentes sobre as emissões de CH_4 e N_2O no período de entressafra e de cultivo do arroz. Nesse sentido, é imprescindível a seleção de sistemas de manejo da palha após a colheita do arroz, que promovam a mitigação das emissões de CH_4 (principalmente) nas lavouras de arroz (SOUZA et al., 2013).

A adição ou manutenção de resíduos no solo podem exercer efeitos distintos sobre as emissões de CH_4 e N_2O , a quantidade e qualidade do material orgânico são relevantes quando se verificam diferenças nas taxas de emissão destes gases. O aporte de resíduos fornece carbono ao sistema e favorece o processo de redução do solo, aumentando a produção de CH_4 (BAYER et al., 2014). Por outro lado, a aplicação de resíduos orgânicos no solo pode ser uma prática capaz de inibir as emissões de N_2O em solos cultivados com arroz, devido à imobilização microbiana do N.

2.5.6 Diversificação de Culturas em Terras Baixas

Considerando a atual conjuntura da região sul do Rio Grande do Sul nas últimas safras de verão, verificou-se uma tendência crescente de utilização das áreas de

terras baixas, tradicionalmente utilizadas com a cultura do arroz, migrando para lavouras de soja. Isso se deve ao resultado de pesquisas que vêm sendo desenvolvidas nos últimos anos por órgãos de pesquisa Públicos e Privados e, também devido ao alto retorno financeiro que a cultura da soja está proporcionando. As pesquisas conduzidas têm focado a adaptação de culturas de sequeiro a estes ambientes, bem como o estabelecimento de bases de um manejo adequado que permitam potencializar e estabilizar o rendimento da soja em solos arrozeiros (VERNETTI JR. et al., 2009; SCHOENFELD, 2010).

A diversificação da produção em áreas baixas é uma demanda dos produtores, pois a orizicultura, principal atividade desenvolvida nessas áreas e difundida em grande parte do território gaúcho, lida com dificuldades ligadas à sustentabilidade, devido à intensificação do sistema de produção, aumento dos custos de produção, disseminação de sementes de plantas espontâneas e degradação do solo. Contudo, ultimamente surgiu o interesse pela utilização de novas alternativas de cultivo em áreas de terras baixas, capazes de manter, ou mesmo, recuperar a qualidade destes solos. O ato de optar pela adoção de sistemas conservacionistas e pela rotação de culturas nas lavouras de arroz são algumas das iniciativas que representam um avanço nas pesquisas com vistas à qualidade produtiva e ambiental neste setor (MENEZES et al., 2012).

Porém, essa mudança de cenário nestes ecossistemas de terras baixas gera uma série de impactos não só de caráter econômico e tecnológico, mas também ambiental. Isto desperta interesse de resultados de pesquisa no RS, sobre o efeito da inserção de culturas de sequeiro em solos propensos ao encharcamento sob as emissões de GEE. Estas áreas, quando cultivadas com arroz irrigado, são fonte potencial de emissão de CH_4 devido às condições de anaerobiose. Contudo, com a entrada da soja como opção de rotação e, por requerer um ambiente drenado para o cultivo, espera-se que haja mitigação das emissões desse gás. No entanto, a ocorrência de chuvas intensas (sendo estes ambientes deficientes em drenagem natural do solo) e, por vezes a ocorrência de frequentes períodos de estiagem, essa alternância entre o excesso e o déficit de umidade no solo podem determinar comportamentos desconhecidos nas emissões GEE.

Neste sentido, são necessárias ações de pesquisa com vistas à identificação de práticas de manejo capazes de mitigar as emissões de CH_4 e de N_2O em solos cultivados com arroz irrigado ou com soja, mas por outro lado, não devem repercutir na redução da produtividade dessas culturas.

2.6 Hipóteses

Os manejos da irrigação para o arroz por inundação intermitente, com manutenção do saturado ou por período reduzido, comparativamente ao sistema irrigado por inundação contínua, favorecem a redução das emissões de CH_4 e aumentam as emissões de N_2O do solo.

O potencial de emissão de CH_4 e N_2O de Planossolo cultivado com arroz irrigado por vários anos é menor que o de área natural sem histórico de cultivo.

A irrigação do arroz por aspersão promove a mitigação das emissões de CH_4 do solo, porém potencializa as emissões de N_2O .

A época e as operações de preparo do solo e de manejo da cobertura vegetal em sistemas de produção de grãos estabelecidos em terras baixas interferem nos fluxos de CH_4 e N_2O do solo.

A introdução de cultivo de sequeiro, como a soja, em rotação ao arroz irrigado em terras baixas reduz o potencial de aquecimento global do sistema de produção.

3 ESTUDO I: Influência de Manejos de Água sobre a Emissão de Metano e Óxido Nitroso em Solo Cultivado com Arroz

3.1 RESUMO

O manejo da água é uma prática preponderante na produção de arroz e tem efeito determinante na condição de oxirredução de solos, constituindo-se, ainda, em opção promissora para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE). Foi conduzido um experimento visando avaliar a influência de manejos de água sobre as emissões de metano (CH_4) e de óxido nitroso (N_2O) em solo cultivado com arroz. O experimento foi conduzido nas safras 2011/2012 (1ª Safra) e 2012/13 (2ª Safra), em Planossolo Háplico, na Estação Experimental Terras Baixas, da Embrapa Clima Temperado, em Capão do Leão, RS. Foram avaliados os tratamentos: Inundação Contínua (IC) - irrigação por inundação contínua; Inundação Contínua por Período Reduzido (PR) – a inundação inicial foi um pouco retardada e a supressão da água no final do ciclo foi um pouco antecipada; Inundação Intermitente (II) - irrigação por inundação iniciada em V4, sendo mantida até o estabelecimento pleno de lâmina de água, quando foi interrompida até o estágio de iniciação da panícula (R0), nesse estágio, realizou-se nova entrada de água na lavoura, com o estabelecimento e manutenção de lâmina de água até a maturação de colheita (estádio R9); Solo Saturado (SS) - solo com ausência de lâmina de água e mantido de forma saturado. Os fluxos de N_2O foram muito mais influenciados por variações na umidade do solo do que com as adubações nitrogenadas. Na 2ª Safra o tratamento IC apresentou a maior emissão de GEE (e maior PAGp), quando comparado com os outros três tratamentos, sendo que o SS apresentou as menores emissões totais. Nas duas safras avaliadas, nos manejos da irrigação II e SS, a redução das emissões de CH_4 foi superior ao efeito no aumento nas emissões de N_2O , ou seja, apresentaram o menor PAGp, mostrando-se mais eficientes na mitigação de GEE em relação aos outros dois tratamentos, IC e PR. Nas duas safras avaliadas obteve-se menores produtividades no tratamento II quando comparado com IC, portanto sistemas de irrigação intermitente em lavouras de arroz irrigado do Sul do Rio Grande do Sul não apresentam capacidade de sustentar a produtividade da cultura do arroz. Em relação à eficiência de uso da água, observou-se que de maneira geral o tratamento IC é o menos eficiente e que o tratamento SS é o mais eficiente.

3.2 INTRODUÇÃO

Agricultura é assumida como sendo uma das principais fontes de gases de efeito estufa (GEE), em particular de óxido nitroso (N_2O) e metano (CH_4), porque ela é responsável por aproximadamente 84% da emissão de N_2O e 52% de CH_4 , do total das emissões antropogênicas de todo o mundo (SMITH et al., 2008). Em nível mundial o cultivo de arroz irrigado por inundação do solo representa de 15% a 20% das emissões de CH_4 , dentre todas as atividades antropogênicas envolvidas na produção e emissão de CH_4 . A produção de CH_4 no solo está relacionada à decomposição microbiana de materiais orgânicos em ambiente anóxico (CONRAD, 2002).

No Brasil, o Rio Grande do Sul é o estado que mais produz arroz, sendo responsável por 48% da área cultivada no país, equivalendo a aproximadamente 1,1 milhões de hectares cultivados sob irrigação por inundação contínua (CONAB, 2015). A produção de arroz em terras baixas no Rio Grande do Sul ocorre no verão e envolve uma série de sistemas de cultivo e práticas de manejo, que influenciam de maneira diferente as emissões de GEE. Assim, é importante identificar alternativas de manejo capazes de mitigar a emissão desses gases, sem afetar a produtividade da cultura.

A irrigação por inundação contínua em lavouras de arroz, em que a cultura permanece com uma lâmina de água sobre a superfície do solo durante praticamente todo o ciclo da cultura, é tradicionalmente adotada no Rio Grande do Sul, devido à alta disponibilidade de água que o estado possui e, principalmente, pelos benefícios para a cultura, como controle de plantas espontâneas, da temperatura do solo e aumento na disponibilidade de nutrientes ao longo do cultivo (SOSBAI, 2014). Além disso, o sistema de inundação contínua do solo promove inúmeras modificações nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. A atividade biológica do solo alagado é alterada em consequência do consumo do O_2 remanescente (NEUE et al., 1997), proliferando os micro-organismos anaeróbios facultativos e obrigatórios (PONNAMPERUMA, 1972; NEUE et al., 1997). Os micro-organismos obtêm energia para a realização de seus processos vitais à custa da oxidação do carbono (C) dos compostos orgânicos, por meio de reações de oxidação e redução (reações redox). De forma distinta dos micro-organismos aeróbios, que utilizam o O_2 comoceptor final de elétrons, os micro-organismos anaeróbios usam compostos inorgânicos oxidados do solo como o nitrato (NO_3^-), os óxidos de manganês (Mn^{4+}), os óxidos de ferro (Fe^{3+}) e o sulfato (SO_4^{2+}), como eletroaceptores (CAMARGO et al., 1999).

Quando ocorre a diminuição da disponibilidade dos aceptores inorgânicos, os micro-organismos anaeróbios passam a utilizar aceptores de origem orgânica, caracterizando um processo conhecido como fermentação. A fermentação constitui-se em um dos principais processos bioquímicos responsáveis pela decomposição dos compostos orgânicos em solos alagados (NEUE et al., 1997), cujos produtos resultantes são predominantemente etanol, acetato, H_2 , N_2 , CO_2 e CH_4 (MOSIER et al., 1989). O CH_4 é um dos produtos da etapa final de decomposição de materiais orgânicos em meio anaeróbio (CONRAD, 2005; COSTA et al., 2008a), mediada por micro-organismos metanogênicos, especialmente bactérias.

Em relação ao N_2O , esse é formado sob condições de solo mais oxidadas ($Eh > 200$ mV) comparado ao CH_4 ($Eh < -100$ mV) (HOU et al., 2000). Os principais processos responsáveis pela produção e emissão de N_2O são a nitrificação e a desnitrificação, ambos influenciados por condições físicas (difusão de O_2 e temperatura do solo), químicas (concentração de amônio e nitrato e, disponibilidade de C facilmente metabolizável) e biológicas do solo (atividade microbiana) (COSTA et al., 2008a). A produção de N_2O por nitrificação é maximizada por condições de umidade no solo quando o espaço poroso preenchido por água (PPA) encontra-se na faixa de 35-60%. A desnitrificação, que é um processo anaeróbio, é favorecida por PPA superiores a 70%, sendo considerado o processo predominante na emissão de N_2O dos solos (COSTA et al., 2008a).

O manejo da água é uma prática preponderante na produção de arroz, constituindo-se, ainda, em opção promissora para a mitigação das emissões de CH_4 (TYAGI et al., 2010). O sistema de irrigação por inundação contínua proporciona condições anaeróbias no solo, que favorecem a produção e a emissão de CH_4 (REDDY, 2015). Já a intermitência da irrigação em determinados períodos durante o cultivo, como realizada nos sistemas de irrigação intermitente ou até um manejo que mantenha o solo somente saturado, tem potencial para reduzir as emissões de CH_4 (TOWPRAYOON et al., 2005; TYAGI et al., 2010; IRRI, 2015), pois a aeração temporária do solo causa mudanças na química redox do solo (VAHL & SOUSA, 2004; KIM et al., 2014), na atividade das bactérias metanogênicas e bactérias oxidantes de CH_4 (ZHANG et al., 2011), e na disponibilidade de elementos e compostos tóxicos às plantas (HOU et al., 2000), possibilitando a diminuição do efluxo de CH_4 (ZHANG et al., 2011; KUDO, 2014), embora possa potencializar as emissões de N_2O .

Embora o controle da irrigação possa efetivamente contribuir para controlar as emissões de CH_4 e N_2O (JOHNSON-BEEBOUT et al., 2009), é importante considerar se essa prática de manejo afeta o potencial produtivo da cultura e a partir dessa observação determinar se o controle da irrigação confere uma estratégia mitigadora das emissões de GEE. Neste aspecto, alguns estudos indicam que não foram observadas diferenças na produtividade do arroz utilizando sistemas de irrigação intermitentes em comparação a irrigação contínua (MOTERLE et al. 2013; KIM et al., 2014). A possível redução no rendimento do arroz é uma das justificativas pela qual essa prática não é atualmente recomendada para as lavouras orizícolas no RS.

Em função do exposto, realizou-se um trabalho com o objetivo de avaliar a influência do manejo de água (inundação contínua, inundação contínua por período reduzido, irrigação intermitente e manutenção do solo saturado) sobre as emissões de CH_4 e N_2O , desempenho produtivo e eficiência de uso da água pela cultura de arroz irrigado.

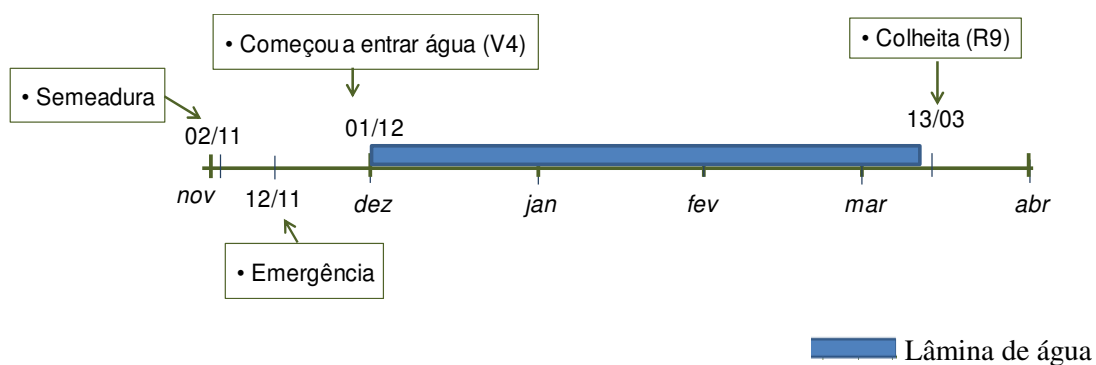
3.3 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido em área da Estação Experimental Terras Baixas (ETB) da Embrapa Clima Temperado, localizada no município do Capão do Leão, RS, durante as safras 2011/2012 (1ª Safra) e 2012/13 (2ª Safra). O solo é classificado como Planossolo Háptico (STRECK et al., 2008).

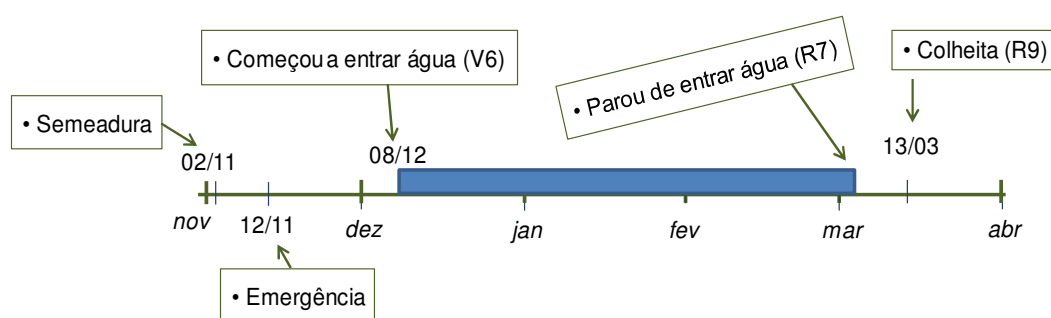
Os tratamentos compreenderam quatro manejos da água para o arroz irrigado, sendo três repetições para cada tratamento, selecionados de um experimento mais amplo, delineado em blocos ao acaso com cinco repetições. As unidades experimentais apresentaram 100 m^2 (10 m x 10 m). A descrição dos tratamentos avaliados são apresentados na sequência e melhor ilustrados na Figura 1:

- Inundação Contínua (IC): irrigação por inundação iniciada quando as plantas de arroz se encontravam no estágio de quatro folhas (V4), com manutenção de uma lâmina de água de cerca de 7,5 cm até a maturação dos grãos, correspondendo ao estágio R9, segundo a escala de Counce et al. (2000);
- Inundação Contínua por Período Reduzido (PR): esse manejo de água é similar ao tratamento com inundação contínua (IC), a diferença foi que neste manejo (PR) a inundação inicial foi um pouco retardada e a supressão da água no final do ciclo foi um pouco antecipada, ou seja, a irrigação foi iniciada quando as plantas de arroz se encontravam no estágio de seis folhas (V6), com manutenção de uma lâmina de água de

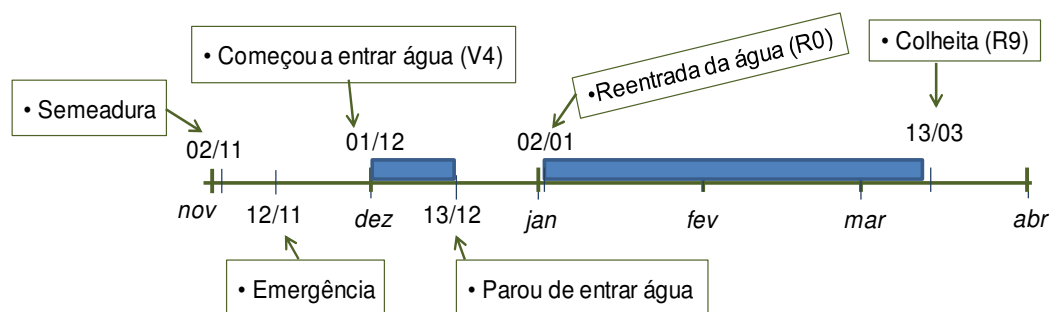
Inundação Contínua (IC):



Inundação Contínua por Período Reduzido (PR):



Inundação Intermitente (II):



Solo Saturado (SS):

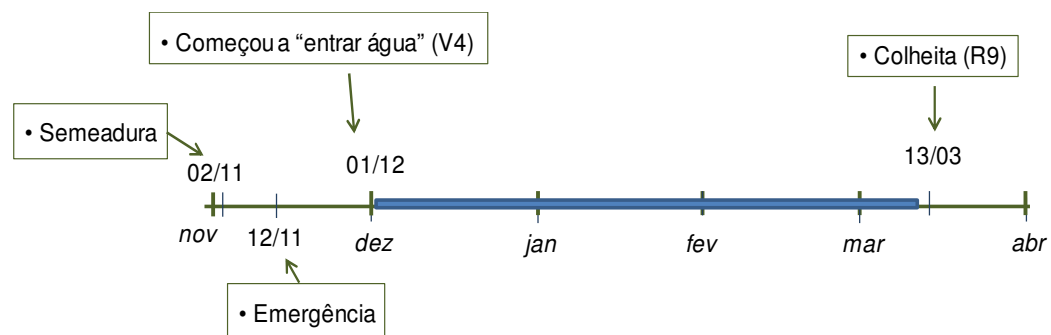


Figura 1. Esquema/exemplo de condução a campo dos quatro tratamentos na safra 2011/2012 (1ª Safra).

cerca de 7,5 cm até o estágio R7, segundo a escala de Counce et al. (2000).

- Inundação Intermitente (II): irrigação por inundação iniciada em V4, sendo mantida até o estabelecimento pleno de lâmina de água, quando foi interrompida até o estágio de iniciação da panícula (R0). Neste estágio, realizou-se nova entrada de água na lavoura, com o estabelecimento e manutenção de lâmina de água até a maturação de colheita (estádio R9);
- Solo Saturado (SS): solo com ausência de lâmina de água e mantido de forma saturado, no período em que as plantas de arroz se encontravam no estágio de quatro folhas (V4) até a maturação dos grãos (R9), segundo a escala de Counce et al. (2000).

3.3.1 Condução dos Experimentos durante as Safras 2011/2012 e 2012/13

Safra 2011/2012 (1ª Safra)

A semeadura do arroz, cultivar BRS Querência, foi realizada no dia 02 de novembro de 2011 em todos os tratamentos, utilizando-se uma densidade de 120 kg ha^{-1} de sementes e, a emergência do arroz ocorreu no dia 12 de novembro de 2011 (50% de emergência). O solo apresentava, na camada de 0-20 cm, análises realizadas segundo Tedesco et al. (1995), 1,1% de matéria orgânica (MO) e $\text{pH}_{\text{água}} = 6,2$ (calagem dispensada). Como adubação básica de semeadura, aplicaram-se 250 kg ha^{-1} da formulação 5-20-20, de forma localizada nos sulcos de semeadura. Em cobertura, foram aplicados 100 kg de N (222 kg ha^{-1} de ureia), parcelados em duas aplicações, 55 kg ha^{-1} de N, no estágio de quatro folhas (V4), e 45 kg ha^{-1} de N, na iniciação da panícula (R0). A primeira adubação nitrogenada em cobertura no interior de todos os coletores de GEE foi feita sobre a lâmina de água no dia 12 de dezembro de 2011, sendo 11 dias após o início da irrigação (01 de dezembro de 2011) nos tratamentos IC, II e SS e, 4 dias após o início da irrigação (08/12/11) no tratamento PR. Já a segunda adubação nitrogenada foi realizada em todos os tratamentos no dia 02 de janeiro de 2012, sendo sobre uma lâmina de água não circulante, nos tratamentos IC e PR, em solo seco no tratamento com irrigação II, imediatamente antes da segunda entrada de água na lavoura e, em solo saturado, no tratamento SS.

No manejo com Inundação Intermitente, o primeiro período de irrigação do arroz durou 12 dias, quando suspendeu-se a irrigação por 20 dias. A segunda entrada de água ocorreu somente aos 51 dias após a emergência, correspondendo ao estágio de iniciação da panícula.

As coletas de ar foram realizadas de novembro de 2011 a março de 2012, iniciando após a semeadura do arroz, estendendo-se até uma semana após sua colheita (20 de março de 2012), em intervalos regulares, de aproximadamente sete dias.

Safra 2012/2013 (2ª Safra)

A semeadura do arroz, cultivar BRS Pampa, foi realizada no dia 01 de dezembro de 2012 em todos os tratamentos, utilizando-se uma densidade de 110 kg ha^{-1} de sementes e, a emergência do arroz ocorreu no dia 12 de dezembro de 2012 (50% de emergência). O solo apresentava, na camada de 0-20 cm, análises realizadas segundo Tedesco et al. (1995), 1,2% de matéria orgânica (MO) e $\text{pH}_{\text{água}} = 6,0$ (calagem dispensada). A irrigação foi lenta no início, com estabelecimento definitivo da lâmina de irrigação em 31 de dezembro de 2012 e no dia 08 de janeiro de 2013 no tratamento PR. Como adubação básica de semeadura, aplicaram-se 313 kg ha^{-1} da formulação 5-20-20, de forma localizada nos sulcos de semeadura. Em cobertura, foram aplicados 105 kg de N (233 kg ha^{-1} de ureia), parcelados em duas aplicações, 55 kg ha^{-1} de N, no dia 08 de janeiro de 2013, sendo 8 dias após o início da irrigação (31/12/12) nos tratamentos IC, II e SS e, no tratamento PR, imediatamente antes da entrada de água na lavoura (08/01/13), e 50 kg ha^{-1} de N em todos os tratamentos na iniciação da panícula (R0) (27 de janeiro de 2013).

No manejo com Inundação Intermitente, o primeiro período de irrigação do arroz durou 8 dias, quando suspendeu-se a irrigação por 21 dias. A segunda entrada de água ocorreu somente aos 47 dias após a emergência, correspondendo ao estágio de iniciação da panícula.

As coletas de ar foram realizadas de dezembro de 2012 a abril de 2013, ou seja, iniciando logo após a semeadura do arroz, estendendo-se até uma semana após sua colheita (22 de abril de 2013), em intervalos regulares, de aproximadamente sete dias.

3.3.2 Coleta e Análise da Solução do Solo

Previamente à inundação do solo, foram instalados nas parcelas experimentais selecionadas de cada tratamento, um extrator de solução de solo semelhante ao desenvolvido por Sousa et al. (2002), com algumas adaptações para coletas em campo (Figura 2). Um tubo de polietileno revestido com tela de nylon e enrolado em forma de espiral foi posicionado a 10 cm de profundidade para extração da solução do solo; a ligação entre o tubo e a câmara eletrométrica foi realizada por meio de um tubo de

polietileno flexível de 2 mm de diâmetro (tipo espaguete), que permaneceu fixo a uma estaca colocada junto ao extrator. Nesse tubo espaguete, no momento das coletas, era conectada uma seringa plástica com capacidade para 60 mL, a qual era aplicado vácuo para a sucção da solução do solo.



Figura 2. Vista da instalação de um extrator de solução do solo à campo.

As coletas de solução do solo foram realizadas uma vez por semana, nos mesmos dias das amostragens de ar, durante todo o período em que o solo se encontrava alagado. As análises de pH e Eh da solução do solo foram realizadas “in situ” (Figura 3), com eletrodo combinado específico, ligado a um potenciômetro e previamente instalado em uma célula eletrométrica, construída em vidro, semelhante à utilizada por Sousa et al. (2002). Como a célula permanecia preenchida por solução durante as leituras, foi possível minimizar o contato desta com o oxigênio molecular, diminuindo os riscos de alteração de suas características eletroquímicas. Os valores de potencial de oxirredução medidos foram corrigidos para o potencial padrão do eletrodo de referência (AgCl), conforme a fórmula: $Eh = E_{\text{medido}} + 220 \text{ mV}$. Após as determinações do pH e Eh, as amostras foram filtradas em filtro milipore[®] de $0,45\mu\text{m}$, transferindo-se aproximadamente 30 mL de solução para frascos contendo 1 mL de HCl 3 mol L^{-1} , para que a concentração final de HCl da amostra ficasse em torno de $0,1 \text{ mol L}^{-1}$, possibilitando, desta maneira, a análise da composição química das amostras em laboratório. Nas amostras foram avaliados os teores totais de ferro e manganês, utilizando-se metodologia descrita em Tedesco et al. (1995).



Figura 3 Vista dos equipamentos para análise de pH e Eh da solução do solo realizadas “in situ.

3.3.3 Amostragem e Análise dos Gases

A amostragem dos gases foi realizada por meio do método da câmara estática fechada (MOSIER, 1989), de acordo com os procedimentos padronizados pelo Comitê de Cultivo de Arroz e Fluxo de Gases (RICE), como parte do Projeto “International Global Atmospheric Chemistry” (IGAC).

A câmara estática fechada foi constituída por uma base quadrada (63 cm x 63 cm) e 30 cm de altura, em alumínio, que permanecia fixa no solo durante toda a safra do arroz e servia de suporte para a colocação da câmara (topo) no momento das coletas. Na parte superior da câmara (topo), dois ventiladores faziam a homogeneização do ar no interior da câmara durante 30 segundos antes de cada amostragem, evitando a formação de gradientes de concentração, enquanto que um termômetro digital com precisão de 0,1° C registrava a temperatura do interior da câmara. Em lados opostos das bases, dois orifícios ($\varphi = 2,6$ cm) permitiam a circulação da água de irrigação quando as coletas de ar não estavam sendo realizadas. Durante as coletas, estes orifícios foram vedados com rolhas de borracha.

As bases foram instaladas no solo após a semeadura do arroz, sendo utilizada uma base para cada uma das três repetições dos tratamentos. A frequência de coletas foi semanal no período de crescimento do arroz (de novembro a março/abril). Em cada coleta, as câmaras de alumínio eram dispostas sobre as bases, sendo que o fechamento hermético do conjunto câmara-base era obtido pela colocação de água na canaleta da base na qual a câmara (topo) se encontrava apoiada. À medida que as plantas de arroz cresciam, foram utilizados extensores de alumínio inseridos entre a base e o topo da câmara.

As amostragens de ar foram realizadas durante o período da manhã, no intervalo entre 9 e 12 horas, pois segundo Costa et al. (2008b) os valores obtidos nesse período representam as emissões médias diárias de GEE no Sul do Brasil. As amostragens de ar foram realizadas em tempos pré-determinados (0, 5, 10 e 20 minutos) após o fechamento da câmara estática. As amostras de ar foram coletadas com seringas de polipropileno de 20 mL, acopladas na parte superior do topo. Em cada seringa foi adaptada uma válvula de três vias, que era fechada imediatamente após a coleta, sendo as seringas acondicionadas em caixas de isopor contendo gelo em gel para resfriamento. Na 1ª Safra essas caixas foram lacradas e transportadas para análise no Laboratório de Biogeoquímica Ambiental do Departamento de Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul para análise em 24 horas, já na 2ª Safra, as amostras foram transferidas para extaneirs de vidro, para serem analisadas alguns dias mais tarde.

Por ocasião das adubações nitrogenadas em cobertura, foram realizadas coletas com maior frequência (aproximadamente a cada 2 dias), por um período de uma semana após a aplicação do fertilizante (início do perfilhamento e na iniciação da panícula), a fim de se obter um maior detalhamento das emissões dos GEE nesse período.

As amostras de ar foram analisadas e as concentrações de N₂O e CH₄ foram determinadas por cromatografia gasosa, em equipamento Shimadzu GC-2014 (modelo “Greenhouse”). O equipamento consta de três colunas empacotadas, sendo o N₂O quantificado via detector de captura de elétrons (ECD) a 325 °C, e o CH₄ quantificado no detector de ionização de chama (FID) a 250 °C.

Os fluxos de CH₄ e N₂O foram estimados utilizando-se a equação 1:

$$f = (\Delta Q / \Delta t) \cdot (PV / RT) \cdot (M / A) \quad \text{(Equação 1)}$$

onde, f é o fluxo de N₂O ou CH₄ (μg de N₂O ou CH₄ $\text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$), Q é a quantidade do gás ($\mu\text{mol mol}^{-1}$) na câmara no momento da coleta, P é a pressão atmosférica (atm) no interior da câmara - assumida como 1 atm, V é o volume da câmara (L), R é a constante dos gases ideais (0,08205 atm. L $\text{mol}^{-1} \text{K}^{-1}$), T é a temperatura dentro da câmara no momento da coleta (K) e M é a massa molar do gás ($\mu\text{g mol}^{-1}$) e A é a área da base da câmara (m^2). A taxa de aumento do gás no interior da câmara foi obtida pelo coeficiente angular da equação da reta ajustada entre a concentração dos gases e o tempo. A partir dos valores de fluxo calculados foram estimadas as emissões diárias, e a emissão total do período avaliado foi calculada pela integração da área sob a curva obtida pela interpolação dos valores diários de emissão de N₂O e de CH₄ do solo (GOMES et al., 2009).

Com base na emissão acumulada de CH_4 e de N_2O e considerando o potencial de aquecimento global (PAG) de cada gás em relação ao dióxido de carbono, foram calculadas as emissões em quantidades de CO_2 equivalente, cuja soma foi denominada de Potencial de Aquecimento Global parcial (PAGp). Sendo que os valores de PAG são de 25 vezes para o CH_4 e de 298 para o N_2O , considerando um tempo de permanência na atmosfera de 100 anos (FORSTER et al., 2007).

3.3.4 Parâmetros de Planta

O acompanhamento dos estádios de desenvolvimento das plantas de arroz foi realizado utilizando-se como referência a escala de Counce et al. (2000).

A produtividade de grãos do arroz foi determinada na maturação de colheita (estádio R9). A produtividade de grãos foi determinada considerando-se as plantas de cinco subamostras 4 m^2 coletadas de cada unidade experimental. O material colhido foi trilhado, seco e pesado, convertendo-se os dados para 130 g kg^{-1} de umidade (13%).

3.3.5 Volume de água utilizado

O volume de água aplicado ao arroz foi medido por meio de hidrômetros individuais, com acompanhamento diário das quantidades utilizadas na irrigação.

3.3.6 Análise estatística

Os fluxos diários e a emissão total dos GEE foram analisados de modo descritivo (média \pm desvio padrão).

Os dados de produtividade de grãos e de água aplicada foram submetidos à análise de variância, comparando-se as médias dos tratamentos pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

3.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.4.1 Fluxo de Metano e Óxido Nitroso do Solo

Nas Figuras 4 e 5 são apresentadas as variações temporais das emissões de CH_4 e N_2O nas duas safras avaliadas, sendo que na 1ª Safra, no período inicial sem a lâmina de água, praticamente não houve emissão de CH_4 , mas somente de N_2O (Fig. 1b e 1c). A semeadura do arroz na 1ª Safra ocorreu em 02 de novembro de 2011 e a entrada de água foi 01 de dezembro de 2011, ou seja, 29 dias após, nesse período foi realizada apenas uma coleta de GEE. Enquanto que na 2ª Safra a semeadura do arroz ocorreu em

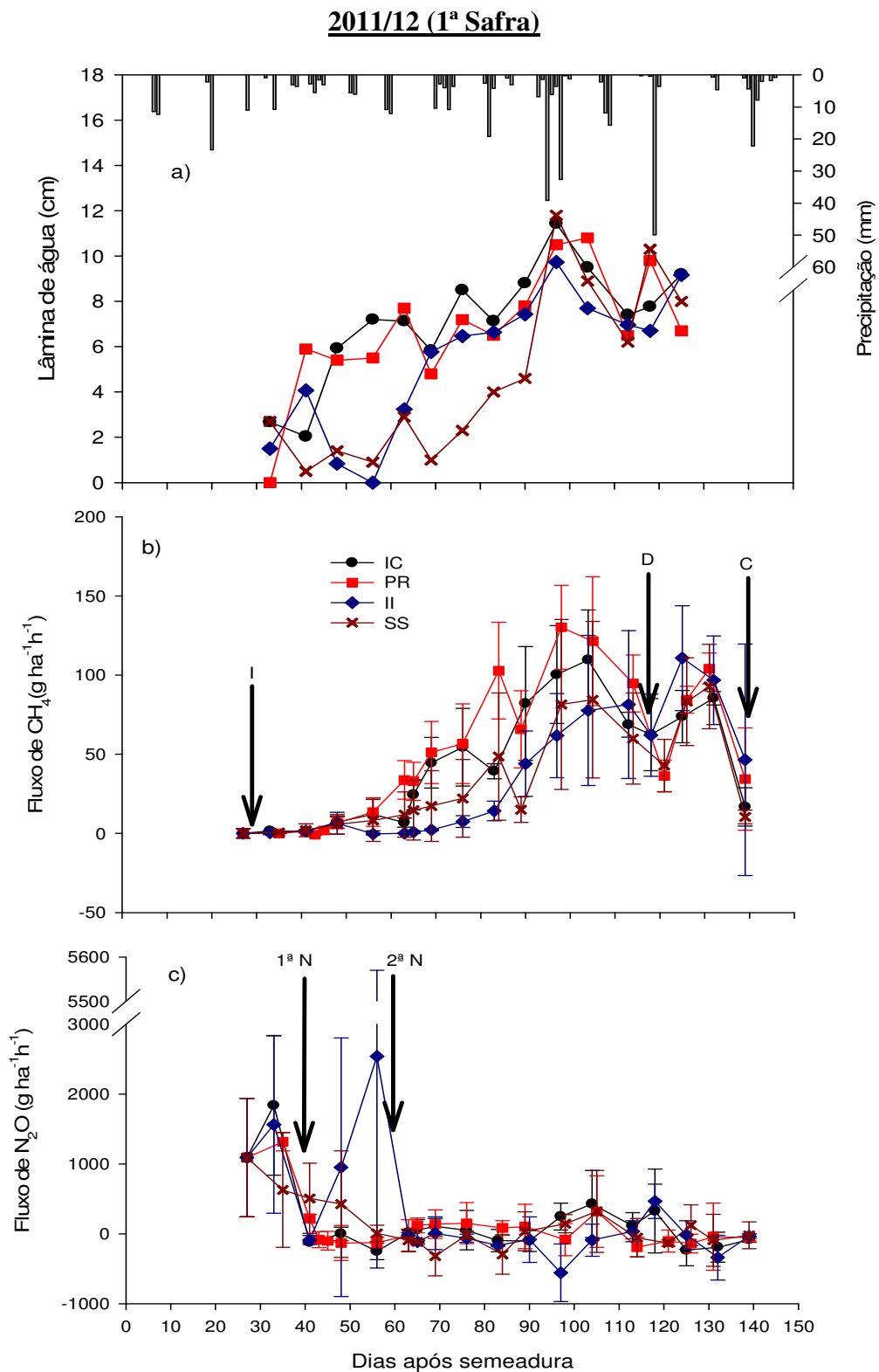


Figura 4. Fluxos de CH₄ e de N₂O em um Planossolo cultivado com arroz irrigado por diferentes tipos de irrigação, sendo: (a) a lâmina de água e a precipitação nos tratamentos avaliados; (b) o fluxo de CH₄ e, (c) o fluxo de N₂O na safra 2011/12. I = início da irrigação; D = supressão da irrigação; C= colheita; 1ª e 2ª N = adubações de cobertura de N. IC: Inundação Contínua; PR: Inundação Contínua por Período Reduzido; II: Inundação Intermitente; SS: Solo Saturado. Barras verticais representam o desvio padrão da média.

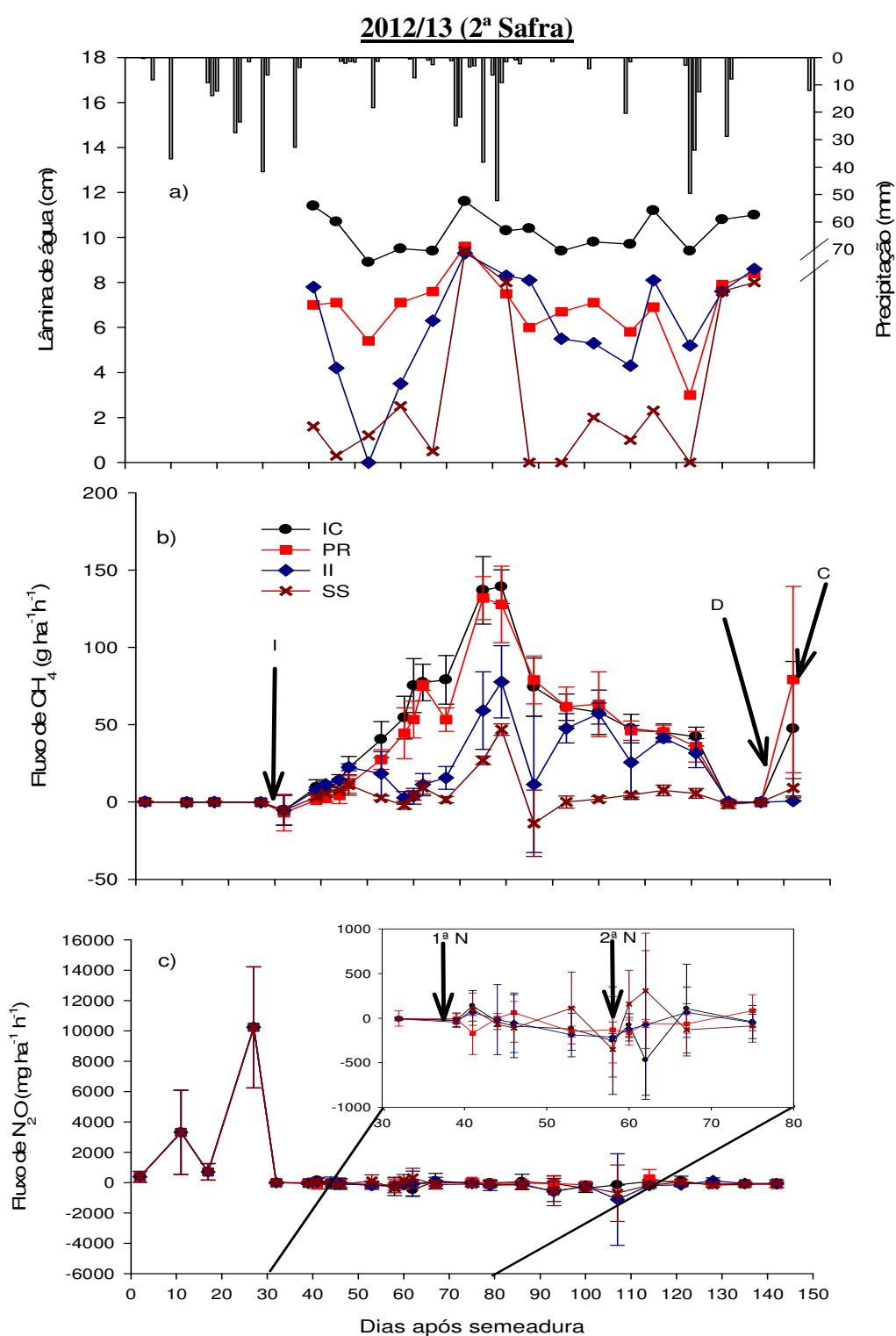


Figura 5. Fluxos de CH_4 e de N_2O em um Planossolo cultivado com arroz irrigado por diferentes tipos de irrigação, sendo: (a) a lâmina de água e a precipitação nos tratamentos avaliados; (b) o fluxo de CH_4 e, (c) o fluxo de N_2O na safra 2012/13. I = início da irrigação; D = supressão da irrigação; C = colheita; 1ª e 2ª N = adubações de cobertura de N. IC: Inundação Contínua; PR: Inundação Contínua por Período Reduzido; II: Inundação Intermitente; SS: Solo Saturado. Barras verticais representam o desvio padrão da média.

01 de dezembro de 2012 e a entrada de água, em 31 de dezembro de 2012, ou seja, 30 dias após, sendo que nesse período foram realizadas quatro coletas de GEE.

No período em que o arroz se desenvolveu sem a lâmina de água, praticamente também não houve emissão de CH_4 , mas quase toda emissão de N_2O ocorreu nesse período (Fig. 2b e 2c). Em relação aos fluxos de N_2O , observou-se picos bem maiores na 2ª Safra quando comparados com a 1ª Safra, um fato que possivelmente influenciou nesse resultado foi que na 2ª Safra foram realizadas mais coletas (quatro), quando comparado com o mesmo período (sem a lâmina de água) da safra anterior (uma apenas).

Nas duas safras os fluxos de CH_4 foram praticamente nulos nos primeiros dias após a semeadura do arroz e seguiram assim, no período inicial da inundação do solo em todos os tratamentos de manejo da água, sendo que aproximadamente dois meses após a semeadura as taxas de emissão de CH_4 aumentaram sensivelmente (Figuras 4b e 5b). No geral ocorreram dois picos de emissão de CH_4 em quase todos os tratamentos nas duas safras, um no início do período reprodutivo e o outro na época de colheita do arroz. Na 1ª Safra o primeiro pico ocorreu no período de florescimento (R4) 96 dias após a semeadura e o segundo pico ocorreu 131 dias após a semeadura, ou seja, 9 dias antes da colheita. Na 2ª Safra o primeiro pico ocorreu na fase de emborrachamento (R2) 80 dias após a semeadura e o segundo pico ocorreu instantes antes da colheita do arroz. As chuvas ocorridas na época da entrada de água nos tratamentos com Inundação Contínua, Intermitente e Solo Saturado, fez com que o tratamento Inundação Contínua por Período Reduzido (nas duas safras) não ficasse sem água de V4 a V6 e também devido a chuvas ocorridas na época da supressão da água de irrigação (Figuras 4a e 5a), fizeram com que esse tratamento tivesse comportamento similar ao tratamento com Inundação Contínua.

Fluxos de CH_4 praticamente nulos nos primeiros dias após a inundação do solo, como os determinados em todos os manejos da água para o arroz, têm sido observados por vários autores, os quais atribuem tal comportamento ao fato de, nas primeiras semanas após a semeadura do arroz, os níveis de bactérias metanogênicas serem geralmente baixos, com a ocorrência preferencial de reações de redução de NO_3^- , MnO_2 , $\text{Fe}(\text{OH})_3$ e SO_4^{2-} , portanto, não ocorrem grandes emissões de CH_4 (NOUCHI et al, 1990; KO & KANG, 2000; AHMAD, 2009). Outro fator determinante da baixa ocorrência de emissões de CH_4 nos primeiros dias após a inundação do solo são os altos valores de potencial redox (Eh) neste período (Figuras 6e e 6j).

Na fase inicial (logo após a inundação do solo), pode ter ocorrido maior produção de ácidos orgânicos, como o acético, o propiônico e o butírico, por micro-organismos anaeróbios facultativos ou obrigatórios (GRAUPE et al., 2007). Nesse sentido, Sousa (2001) encontrou maiores concentrações de ácidos orgânicos nas primeiras semanas após a inundação do solo. Anteriormente à formação de CH_4 , ocorre a acetogênese (conversão de ácidos orgânicos com mais de dois carbonos a ácido acético), que é uma etapa intermediária entre a produção de ácidos orgânicos e a formação de CH_4 , uma vez que não é possível a conversão direta dos ácidos butírico e propiônico a CH_4 (BOHNEN et al., 2005), sendo esse um processo que também retarda o início das emissões de CH_4 do solo após o alagamento.

Os aumentos expressivos nas emissões de CH_4 dias após a inundação do solo, em todos os tratamentos (Figuras 4b e 5b), coincidiram com o aumento dos teores de Fe^{+2} (Figuras 6b e 6g) e Mn^{2+} (Figuras 6c e 6h) na solução solo, isso indica que o início das emissões de CH_4 ocorreu após as reduções sequenciais de Mn (III e IV) e de Fe (III) no solo. Após esses elementos atuarem como aceptores de elétrons no processo de redução, os compostos orgânicos passaram a ser utilizados por bactérias metanogênicas, havendo a intensificação da produção de CH_4 no solo (SILVA et al., 2011).

Na 1ª Safra em todos os manejos de água, os picos de emissão de CH_4 coincidiram com a estabilização do pH e do Eh em seus valores máximos e mínimos, respectivamente (Figura 4b e 6d e 6e). Silva et al. (2011), estudando a dinâmica da emissão de CH_4 em diferentes solos no Rio Grande do Sul, observaram essa mesma relação entre a emissão de CH_4 e os parâmetros pH e Eh.

Nas duas safras (2011/12 e 2012/13), os fluxos de CH_4 foram menores nos tratamentos II e SS, quando comparado com o tratamento IC (Figura 4b e 5b). Nesses dois tratamentos não ocorre um ambiente anaeróbio o tempo todo, ocorrem condições aeróbias em alguns momentos fazendo com que os compostos que antes se encontravam em estado reduzido fossem rapidamente oxidados na presença de oxigênio (RATERING & CONRAD, 1998; KUDO, 2014), eliminando-se a condição de redução do solo, necessária para a produção de CH_4 . Zhang et al. (2010) afirmam que, quanto maior for o período em que o solo permanece drenado e menor seu conteúdo de umidade, maior será o tempo para que os compostos oxidados atinjam o seu estado reduzido após a re-entrada de água na lavoura, atrasando a produção de CH_4 no solo.

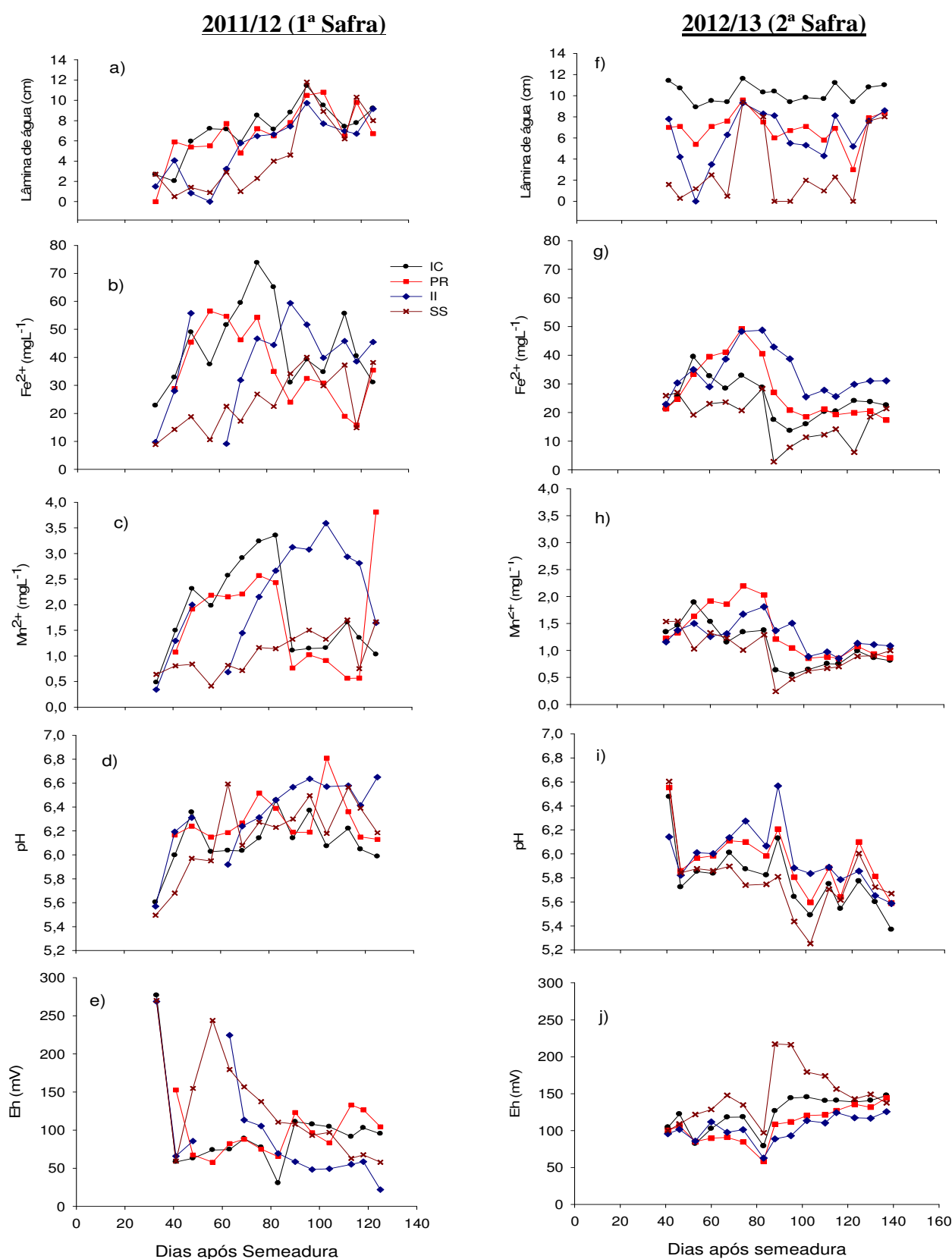


Figura 6. Altura da lâmina de água (“a” e “f”); teores de Fe^{2+} (“b” e “g”) e de Mn^{2+} (“c” e “h”), e ainda os valores de pH (“d” e “i”) e de Eh (“e” e “j”) no período das avaliações da solução do solo em um Planossolo cultivado com arroz sob diferentes irrigações nas safras 2011/12 e 2012/13, respectivamente. IC: Inundação Contínua; PR: Inundação Contínua por Período Reduzido; II: Inundação Intermitente; SS: Solo Saturado.

Na 1ª Safra o primeiro pico de produção de CH₄ coincidiu com a fase de floração do arroz (R4) (aproximadamente 96 dias após a semeadura) em todos os tratamentos de manejo da água, provavelmente devido ao clímax de produção de fitomassa, à grande liberação de exsudatos radiculares associada à elevada atividade metabólica da planta nesse período. Moterle (2011), ao desenvolver um trabalho também no Rio Grande do Sul, encontrou o primeiro pico de emissão de CH₄ na floração do arroz. Nesse período os exsudatos radiculares servem de substrato para os organismos metanogênicos, aumentando a produção de CH₄ (AULAKH et al., 2001). Segundo esses autores, existe uma correlação positiva entre a massa seca da parte aérea e das raízes do arroz, de forma que a exsudação de compostos orgânicos é comandada pelo aumento da massa da parte aérea e das raízes que, por sua vez, depende da taxa fotossintética das plantas.

Na 2ª Safra o primeiro pico de produção de CH₄ coincidiu com a fase de emborrachamento (R2) 80 dias após a semeadura, ou seja também ocorreu na fase reprodutiva, mas um pouco antes em relação a 1ª Safra. Altas emissões de CH₄ na fase reprodutiva do arroz resultam de condições ambientais (Eh, pH e disponibilidade de nutrientes provavelmente devido à grande liberação de exsudatos radiculares) adequadas à metanogênese (TOWPRAYOON et al., 2005).

Já o segundo pico de emissão de CH₄ nas duas safras, 2011/12 e 2012/13, ocorreu na maturação dos grãos (Figura 4b e 5b). Ocorreu mais intensamente após a supressão da irrigação. Moterle (2011), ao desenvolver um trabalho também no Rio Grande do Sul, também encontrou um segundo pico de emissão de CH₄ na maturação dos grãos, fase em que as folhas mortas caem, depositando-se na superfície do solo formando uma liteira. Isto também ocorre com os perfilhos que não produziram panícula, com as raízes senescentes e suas escamações que, em adição aos exsudatos radiculares, passam a ter participação significativa no fornecimento de C aos organismos metanogênicos (WATANABE et al., 1999). A decomposição anaeróbia desses materiais orgânicos promove decréscimo no potencial redox do solo, conforme observado na Figura 6e, embora esse comportamento não tenha sido verificado na 2ª Safra (Figura 6j), constituindo-se em fonte importante de C para a metanogênese em solos inundados (CAI et al., 1997). E logo após a supressão da irrigação também pode ocorrer a liberação de bolhas de CH₄ que estão aprisionadas sob a lâmina de água, aumentando o fluxo de CH₄ (NEUE et al., 1997) (Figura 5b). Por outro lado, a supressão da irrigação próximo à colheita, promove o secamento gradativo do solo e

consequente aumento da disponibilidade de O_2 , condição essa impeditiva da produção e a emissão de CH_4 (Figura 4b). Nouchi (1994) também sugeriu que uma diminuição nas emissões de CH_4 no final do período de cultivo do arroz é resultado de um declínio da condutividade possivelmente devido à reduzida permeabilidade das raízes como consequência de envelhecimento.

Nas duas safras avaliadas, os fluxos de N_2O foram praticamente nulos na maior parte do período de avaliação, com exceção das primeiras coletas, em que foi observada alguma emissão. Na 1ª Safra, no manejo com irrigação intermitente, ainda foram verificados incrementos nas emissões de N_2O no período em que havia sido realizada a interrupção da irrigação (Figura 4c), o que proporcionou condições de aeração do solo, pela ausência de lâmina de água por período superior a dez dias, promovendo o pico de emissão de N_2O . Mas na 2ª Safra não houve esse pico de emissão no período em que foi realizada a supressão da água no tratamento II (Figura 5c), provavelmente pelas chuvas ocorridas nesse período que impediram o secamento completo do solo.

A alternância de condições de aeração e anoxia no solo, como as que ocorreram no início do período de inundação do solo e durante a supressão da irrigação, nos tratamentos intermitentes, favoreceram a desnitrificação e a liberação de N_2O , como preconizado por Kögel-Knabner et al. (2010). A desnitrificação é o principal processo de produção de N_2O e ocorre em condições anaeróbias; neste os óxidos de N atuam como receptores finais de elétrons (CANTARELLA, 2007).

No tratamento PR, em nenhuma das duas safras foi observado um incremento nas taxas de emissão de N_2O do solo decorrente da adubação nitrogenada (Figura 4c e 5c). Já no tratamento II, verificou-se pico de emissão de N_2O após a primeira cobertura com N (1ª Safra) (Figura 4c), chegando aos $2541 \text{ mg } N_2O \text{ ha}^{-1}\text{h}^{-1}$ (56 dias após a semeadura), o que se explica pela subsequente secagem do solo decorrente da supressão da irrigação, mas este efeito não foi constatado após a segunda cobertura com nitrogênio e em nenhuma cobertura com nitrogênio na safra seguinte (2ª Safra) (Figura 5c).

O tratamento IC não apresentou nenhum incremento na 1ª Safra (em nenhuma das duas aplicações de N) (Figura 4c), já na 2ª Safra houve um pequeno incremento na emissão de N_2O três dias após a primeira adubação nitrogenada (chegando aos $138 \text{ mg } N_2O \text{ ha}^{-1}\text{h}^{-1}$ 41 dias após a semeadura), mas este efeito não foi constatado após a segunda cobertura com nitrogênio (Figura 5c). Em relação ao tratamento SS observa-se, também, que não houve nenhum incremento na 1ª Safra (em nenhuma das duas

aplicações de N) (Figura 4c) e na 2ª Safra apresentou pequenos incrementos três dias após as adubações nitrogenadas (Figura 5c), chegando a 99,6 mg N₂O ha⁻¹h⁻¹.

Essa baixa ou quase nenhuma emissão de N₂O após as adubações nitrogenadas provavelmente se explique pela aplicação no N sobre a lâmina de água, sendo que essas condições de ambiente anaeróbico não favorecem a produção e a emissão de N₂O. Liu et al. (2010) também não constataram incremento nas taxas de emissão de N₂O durante o cultivo do arroz irrigado por inundação contínua, mesmo após aplicações de fertilizante nitrogenado (ureia). Enquanto Pandey et al. (2014) constataram que o aumento na dosagem de fertilizante nitrogenado possibilita aumento nos conteúdos de NH⁺₄ e NO₃⁻ no solo, fornecendo uma fonte mais rica de N para a nitrificação-desnitrificação, e promovendo incremento nas emissões de N₂O.

E por fim, a retirada da água para a realização da colheita do arroz também não promoveu aumento nas taxas de emissão de N₂O, corroborando com os resultados encontrados por Zschornack (2011), mas divergindo com os resultados de outros trabalhos, nos quais a retirada da água de irrigação resultou em aumento das emissões de N₂O do solo (TOWPRAYOON et al., 2005; LIU et al., 2010).

3.4.2 Emissão Total de Metano, Óxido Nitroso do Solo e o PAGp

Na 1ª Safra a interrupção da irrigação no tratamento com inundação intermitente proporcionou redução de 22% e o tratamento com solo saturado proporcionou uma redução de 25% nas emissões totais de CH₄ do solo, relativamente ao manejo com inundação contínua, ou seja, foram de 99,6 kg CH₄ ha⁻¹, 97 kg CH₄ ha⁻¹ e 128,5 kg CH₄ ha⁻¹, respectivamente (Figura 7a), só não houve redução nas emissões no tratamento PR. Na 2ª Safra houve uma redução de 51,5% e 89% nas emissões totais de CH₄, comparando os mesmos tratamentos, ou seja, foram de 65 kg CH₄ ha⁻¹, 14 kg CH₄ ha⁻¹ e 134 kg CH₄ ha⁻¹, respectivamente (Figura 7d) e houve também uma redução de 8% no tratamento PR (124 kg CH₄ ha⁻¹), comparado com o IC. Em um estudo conduzido na safra de 2010/2011, no mesmo local do presente estudo, Wesz (2012) encontrou emissões totais de CH₄ 70% menores no tratamento com irrigação Intermitente comparativamente àquele com Inundação Contínua. Essa diferença na redução das emissões entre os dois trabalhos pode ser atribuída às distinções no manejo da água de ambos os trabalhos. Nestes estudos, procedeu-se apenas uma supressão da irrigação durante o cultivo do arroz, enquanto que no conduzido por Wesz (2012) foram realizadas duas supressões. Aliado a isso, as variações nas condições meteorológicas,

notadamente a temperatura do ar e, a frequência e o volume de chuva durante os períodos de interrupção da irrigação, devem ter contribuído para essa diferença expressiva. Por sua vez, em estudo realizado em Cachoeirinha, RS, Zschornack (2011) observou redução de 41% na emissão total de CH_4 no tratamento com irrigação intermitente, com uma drenagem do solo (de V6 a V8), em relação à irrigação contínua. Em um estudo de Camargo (2015) constatou-se uma redução na emissão total de CH_4 , devido a adoção da irrigação intermitente severo (supressão V6-V8 e V8-V10) de 46% em Camaquã (127 kg ha^{-1} na irrigação contínua e 66 kg ha^{-1} na intermitente) e de 84% em Uruguaiana (745 kg ha^{-1} na irrigação contínua e 120 kg ha^{-1} na intermitente) na safra 2012/13.

Nas duas safras o tratamento SS tendeu a ter as menores emissões totais de CH_4 (Figuras 7a e 7d), pois a menor intensidade de redução do solo (Figuras 6e e 6j) possibilita condições menos favoráveis à metanogênese. Essa redução corrobora com resultados obtidos por Zschornack et al. (2011), os quais observaram redução de 70% nas emissões de CH_4 no manejo com solo saturado em relação a inundação contínua. Wesz (2012) também observou uma redução de 73% numa lavoura manejada com o solo saturado, comparativamente a outra com inundação contínua.

Quando a irrigação não é feita de maneira contínua, tende a potencializar as emissões de N_2O do solo, como se observa na Figura 7b, mas independente disso, trata-se de valores muito baixos. Levando em conta as emissões de CH_4 e N_2O , convertidos em CO_2 equivalente, observou-se a pequena contribuição das emissões do N_2O em todos os manejos de água para o PAGp em relação as emissões totais de CH_4 . Mesmo o N_2O possuindo um potencial de aquecimento em torno de 12 vezes superior ao CH_4 , as emissões predominantemente de CH_4 na safra do arroz, não foram superadas pela maior emissão de N_2O nos períodos intermitentes de irrigação. A emissão total de N_2O durante o período de avaliação na 1ª Safra foi quase duas vezes superior no tratamento II ($0,79 \text{ kg N}_2\text{O ha}^{-1}$), comparativamente ao tratamento com inundação contínua ($0,42 \text{ kg N}_2\text{O ha}^{-1}$). É provável que no manejo intermitente tenha ocorrido alternância das condições de oxidação/redução e, portanto, dos processos de nitrificação e desnitrificação, intensificando a produção e emissão de N_2O , principalmente no período em que houve a interrupção da irrigação. Zschornack (2011) também observou um incremento nas emissões de N_2O em solo cultivado com arroz irrigado por inundação intermitente, sendo que a emissão de N_2O no manejo com irrigação contínua representou apenas 37% da emissão total verificada no manejo intermitente.

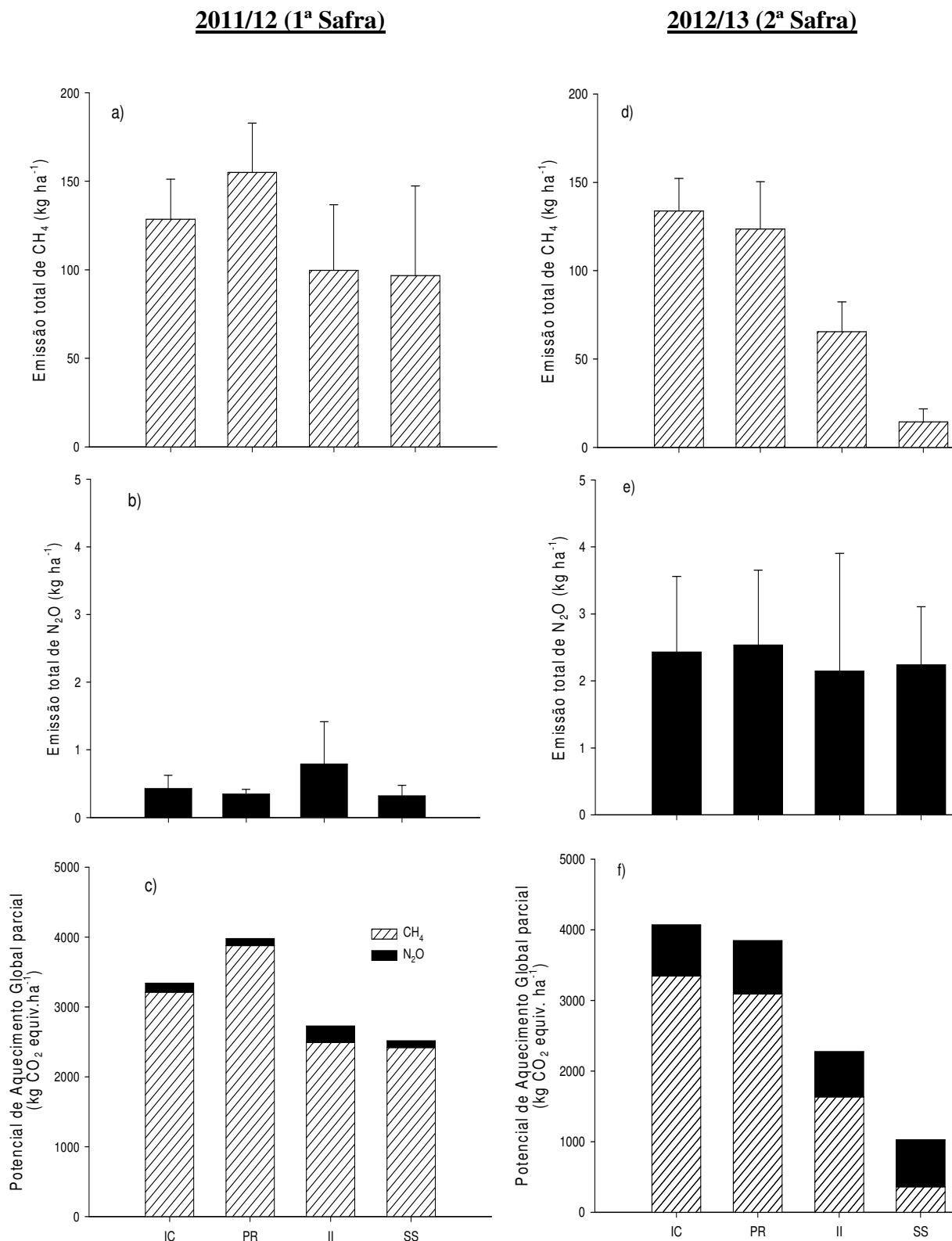


Figura 7. Emissão total de CH₄ (“a” e “d”) e de N₂O (“b” e “e”) e, o Potencial de Aquecimento Global parcial (PAGp) (“c” e “f”) nas safras 2011/12 (1ª Safra) e 2012/13 (2ª Safra), respectivamente. IC: Inundação Contínua; PR: Inundação Contínua por Período Reduzido; II: Inundação Intermitente; SS: Solo Saturado. Barras verticais representam o desvio padrão da média.

Na 2ª Safra a emissão total de N_2O foi bem superior em relação à safra anterior (1ª Safra), principalmente pelo fato de que na segunda safra avaliou-se um período maior antes da entrada da água. E como na 2ª Safra praticamente toda emissão de N_2O ocorreu nesse período inicial, houve pouca diferença entre os tratamentos avaliados.

Em relação ao Potencial de Aquecimento Global parcial (PAGp), que é calculado em equivalente de CO_2 , observou-se que nas duas safras (2011/12 e 2012/13), os tratamentos SS e II apresentaram menor PAGp em relação ao tratamento IC (Figuras 7c e 7f). Na 1ª Safra, essa redução foi de 25% no tratamento SS (2515 kg CO_2 equiv.ha⁻¹) e de 18% no tratamento II (2726 kg CO_2 equiv.ha⁻¹), em relação ao tratamento IC (3340 kg CO_2 equiv.ha⁻¹). Na 2ª Safra, a redução do PAGp dos dois tratamentos, II e SS, em relação ao tratamento IC foi ainda maior. Apresentaram uma redução de 75% no tratamento SS (1028 kg CO_2 equiv.ha⁻¹) e de 44% no tratamento II (2274 kg CO_2 equiv.ha⁻¹) em relação ao tratamento IC (4071 kg CO_2 equiv.ha⁻¹).

Na 1ª Safra no tratamento PR não houve uma redução no PAGp quando comparado com o tratamento inundação contínua (IC), houve sim, até um PAGp maior no tratamento PR, mas esse fato provavelmente ocorreu devido as precipitações que ocorreram no período inicial da irrigação, ou seja, quando o solo ainda era pra estar sem a presença de lâmina de água e com essas precipitações não foi possível mantê-lo assim. Já na 2ª Safra houve uma redução no PAGp de 6% no tratamento PR (3846 kg CO_2 equiv.ha⁻¹) em relação ao tratamento IC (4071 kg CO_2 equiv.ha⁻¹) (Figuras 7c e 7f).

Em todos os quatro tratamentos e nas duas safras 2011/12 e 2012/13 (com exceção do tratamento SS na 2ª Safra), a maior parte da composição do PAGp se origina da emissão de CH_4 e a outra parte bem inferior vem da emissão de N_2O (Figuras 7c e 7f).

3.4.3 Produtividade de Grãos, PAGp/PG e Eficiência do Uso da Água

Em relação à produtividade, na 1ª Safra o tratamento II apresentou a menor produtividade, diferindo estatisticamente dos outros tratamentos (Figuras 8a). Na 2ª Safra os tratamentos II e SS apresentaram menores produtividades em relação aos tratamentos PR (5d) e, II não diferiu de IC. Towprayoon et al. (2005) também observaram uma diminuição da produtividade quando realizaram supressão da água em comparação com o tratamento com inundação contínua. Mas em um estudo realizado por Morteale (2011) o manejo intermitente da irrigação não diminuiu a produtividade do arroz.

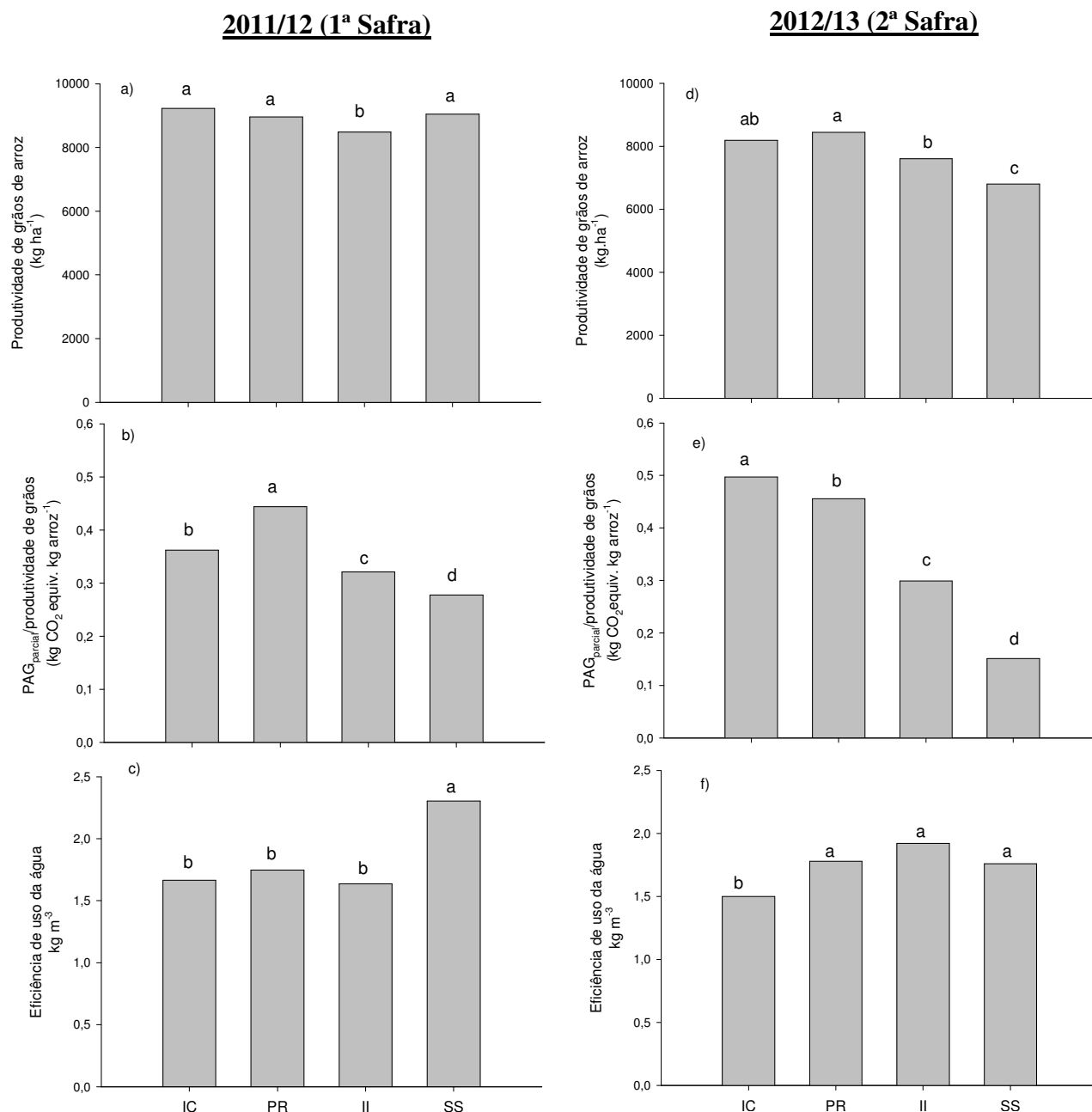


Figura 8. Produtividade de grãos de arroz (“a” e “d”), índice PAGp/PG (“b” e “e”) e eficiência de uso da água (“c” e “f”) em um Planossolo cultivado com arroz sob diferentes manejos da irrigação na safra 2011/12 (1ª Safra) e 2012/13 (2ª Safra), respectivamente. IC: Inundação Contínua; PR: Inundação Contínua por Período Reduzido; II: Inundação Intermitente; SS: Solo Saturado. Colunas com mesma letra não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Com base no índice estabelecido entre o potencial de aquecimento global parcial e a produtividade de grãos (PAGp/PG), de todos os tratamentos, o cultivo de arroz irrigado de forma saturado, mostrou-se mais efetivo em mitigar o PAGp nas duas safras, apresentando valores de 0,28 e 0,15 kg de CO₂ equiv. kg⁻¹ de arroz produzido na

1ª Safra e na 2ª Safra, respectivamente (Figura 8b e 8e). Outro tratamento que também mostrou-se mais efetivo em mitigar o PAGp que os tratamentos IC e PR, nas duas safras, é o tratamento II que apresentou valores de 0,32 e 0,30 kg de CO₂ equiv. kg⁻¹ de arroz produzido na 1ª Safra e na 2ª Safra, respectivamente (Figura 8b e 8e). Enquanto que os tratamentos IC e PR apresentaram respectivamente valores de 0,36 e 0,44 kg de CO₂ equiv. kg⁻¹ de arroz produzido na 1ª Safra e valores de 0,50 e 0,46 kg de CO₂ equiv. kg⁻¹ na 2ª Safra.

A eficiência de uso da água foi similar em todos os tratamentos e nas duas safras, mas vale a pena ressaltar que na 1ª Safra o tratamento SS foi o mais eficiente, diferindo estatisticamente dos outros tratamentos, apresentando 2,3 kg de arroz por m⁻³ de água utilizada (Figura 8c). E na 2ª Safra o tratamento IC foi o menos eficiente, também diferiu estatisticamente dos outros tratamentos apresentando 1,5 kg de arroz por m⁻³ de água utilizado (Figura 8f).

3.5 CONCLUSÃO

Os manejos da irrigação para o arroz por inundação intermitente e com manutenção de solo saturado reduzem as emissões de metano em magnitude superior ao aumento promovido nas emissões de óxido nitroso, sendo mais eficientes na mitigação de emissões de gases de efeito estufa em relação aos manejos por inundação contínua ou por período reduzido.

A irrigação por inundação intermitente proporciona menor produtividade do arroz, relativamente aos manejos por inundação contínua, com manutenção de solo saturado e por período reduzido.

O manejo da irrigação para o arroz com manutenção do solo saturado propicia maior eficiência de uso da água pela cultura do arroz.

4 ESTUDO II: Influência de Sistemas de Irrigação e Culturas sobre a Emissão de Metano e Óxido Nitroso durante dois Anos Completos (duas Safras e duas Entressafras)

4.1 RESUMO

O sistema de irrigação e as práticas de manejo da água são fatores determinantes à produção de arroz, influenciando o efluxo de gases de efeito estufa (GEE), sendo que alguns desses apresentam potencial mitigador das emissões de GEE, comparadas com áreas naturais sem cultivo. Foi conduzido um experimento visando avaliar a influência de dois sistemas de irrigação (Inundação e Aspersão) sobre as emissões de metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O) em solo cultivado com arroz, sendo essas emissões comparadas com uma área natural. O experimento foi conduzido durante a safra 2011/12 e entressafra 2012; safra 2012/13 e entressafra 2013, em Planossolo Háplico, na Estação Experimental Terras Baixas, da Embrapa Clima Temperado, em Capão do Leão, RS. Foram avaliados os tratamentos: Sistema de Irrigação por Inundação; Sistema de Irrigação por Aspersão; e, uma Área Natural em condição natural, ou seja, sem histórico de cultivo. Os picos das emissões de CH_4 no tratamento irrigado por inundação contínua do solo foram verificados nas safras do arroz, coincidente com os estágios de florescimento e de emborrachamento do arroz. No caso da irrigação por aspersão praticamente não houve emissão de CH_4 , sendo que os maiores valores ocorreram numa época em que o solo apresentava umidade superior à saturação, devido à ocorrência de período de elevada precipitação. Em relação as emissões de N_2O , essas foram maiores no tratamento em que foi utilizado o sistema de irrigação por aspersão, comparado com os outros tratamentos. Portanto, o sistema de irrigação por aspersão promove a mitigação das emissões de CH_4 do solo em cultivo de arroz, porém, potencializa as emissões de N_2O . Ainda assim no período da safra, esse sistema pode ser considerado eficiente quanto à redução do potencial de aquecimento global em relação à produção de arroz irrigado por inundação contínua. Nas entressafras o PAGp da área do Aspersão foi maior em relação a área do arroz irrigado por inundação contínua, devido a uma maior emissão de N_2O . No presente estudo, quando comparamos os dois sistemas de irrigação (Inundação e Aspersão) com a área natural, esses por sua vez, apresentam valores muito menores de potencial de aquecimento global parcial em relação à área natural não cultivada.

4.2 INTRODUÇÃO

Em países desenvolvidos as emissões de gases de efeito estufa (GEE) são oriundas principalmente da combustão de combustíveis fósseis, mas no Brasil a realidade é outra, pois aqui as maiores emissões são oriundas da agricultura e da mudança do uso das terras e das florestas (MCT, 2010).

Em meio a todas as atividades humanas envolvidas na produção e emissão de GEE o cultivo de arroz irrigado por inundação representa de 15 a 20% das emissões mundiais de metano (CH_4), cuja produção no solo está relacionada à decomposição microbiana de materiais orgânicos em ambiente anóxico (CONRAD, 2002).

O cultivo de arroz tem sido apontado como uma atividade com alto potencial poluidor por usar grande volume de água para manter a lâmina de irrigação e também por ser um cultivo que demanda o intenso uso de agrotóxicos e nutrientes que podem ser transportados para o ambiente (MEZZOMO, 2009). Nas condições não antropizadas, as áreas naturais de terras baixas estão saturadas com água durante boa parte do ano, o que pode provocar efluxos CH_4 para a atmosfera (efluxo natural de CH_4 para o ambiente). As áreas de cultivo de arroz são drenadas para fins de colheita, manejo de plantas de cobertura, preparo do solo e plantio. A inundação dessas áreas ocorre apenas na estação de cultivo, contribuindo com altos efluxos de CH_4 para a atmosfera.

O Rio Grande do Sul é o Estado brasileiro que mais produz arroz, sendo responsável por quase 70% do arroz produzido no país (CONAB, 2015), cuja área cultivada anualmente supera um milhão de hectares. Praticamente a totalidade da área, é irrigada pelo sistema de irrigação por inundação do solo. Nesse sistema, a emissão de CH_4 é bem maior que as emissões de óxido nitroso (N_2O), podendo responder por mais de 90% da composição do potencial de aquecimento global parcial (ZSCHORNACK et al., 2011).

O sistema de irrigação e as práticas de manejo da água são fatores determinantes à produção de arroz, influenciando o efluxo de GEE, sendo que alguns desses apresentam potencial mitigador das emissões de CH_4 . O sistema de irrigação por inundação do solo proporciona condições anaeróbicas no solo, que favorecem a produção e a emissão de CH_4 (BUENDIA et al., 1997; REDDY, 2015). Pois o CH_4 é produzido como o produto final metabólico de um pequeno grupo de bactérias (*Archaea*) que existem apenas em condições anaeróbicas, como solos alagados e trato digestivo de ruminantes, e esta produção funciona como uma fonte para a atmosfera.

Em áreas cultivadas com arroz, a maior parte do CH_4 é transportado a partir do solo, onde é produzido, através do tecido poroso (aerênquimas) das plantas de arroz para a atmosfera e, durante os meses de inverno, quando não tem a presença do arroz, a maior parte do CH_4 é transportada por difusão e ebulição (bolhas) (HOLZAPFEL-PSCHORN et al, 1986).

Em solos alagados o CH_4 é consumido em ambas as zona aeróbias (rizosfera e camada superficial de um solo alagado) através da via metabólica cosmopolita de um grupo de organismos chamados metanotróficos, que convertem CH_4 em CO_2 . Embora metanotróficos não são um forte sumidouro de CH_4 da atmosfera, eles podem consumir 20-60% de CH_4 produzido em solos de terras baixas de arroz (TYLER et al., 1997).

A cultura do arroz irrigado usa um alto volume de água durante o ciclo para obter produtividades altas (MINAMI & YAGI, 1998). Estimativas indicam o uso de 8000 a 10000 $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ de água durante o seu ciclo, sendo que o alto volume de água usado na cultura do arroz se deve ao tipo de irrigação utilizada, com inundação contínua do solo (SOSBAI, 2014).

Alternativas à inundação contínua na cultura do arroz têm sido desenvolvidas. Uma alternativa de produção com significativa economia de água no cultivo do arroz, adotada por alguns produtores, é o método de irrigação por aspersão. Na década de 90 a irrigação por aspersão começou a ser considerada no cultivo de arroz nos Estados Unidos, no intuito de reduzir o uso da água e oferecer alternativas de cultivo nas áreas onde a irrigação por inundação eram predominantes (WESTCOTT & VINES, 1986). Atualmente produtores de arroz da Fronteira Oeste do Rio Grande do Sul, região onde há menor disponibilidade hídrica quando comparada a região orízicola do Sul do estado, e por conta do relevo mais ondulado o uso de água para irrigação por inundação do arroz é maior, começaram a utilizar a irrigação por aspersão. Esse sistema de irrigação por aspersão não proporciona condições ideais para a produção de CH_4 , pois mantém condições de solo oxidado, mas é provável que haja uma alternância das condições de oxidação/redução, o que favorece os processos alternados de nitrificação e denitrificação, intensificando a produção e emissão de N_2O , principalmente nos períodos que forem efetuadas as adubações nitrogenadas.

Quando se trata das emissões de GEE, nas últimas duas décadas foram realizadas várias medições de campo com foco em emissões de CH_4 e N_2O apenas durante épocas de cultivo do arroz (YU et al, 1997; YAO et al, 2012). No entanto, estudos recentes demonstraram que as emissões de N_2O na entressafra do arroz, ou seja,

enquanto culturas de sequeiro são cultivadas, são maiores do que aqueles na safra do arroz (SOUZA, 2013; MA et al, 2013; ZHOU et al, 2014). No entanto, devido à falta de medições simultâneas de emissões de CH₄ e N₂O ao longo ciclo do período anual (LIU et al, 2010; YAO et al, 2013), pouco se sabe sobre os fluxos anuais de CH₄ e N₂O provenientes de sistemas de cultivo de arroz nas áreas de terras baixas no sul do Brasil.

Em função do exposto, foi realizado o presente trabalho, que teve por objetivo avaliar as emissões de CH₄ e N₂O em cultivos de arroz irrigado por inundação e por aspersão, comparando-as a uma área natural.

4.3 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido em área da Estação Experimental Terras Baixas (ETB) da Embrapa Clima Temperado, localizada no município do Capão do Leão, RS, durante a safra 2011/12 e entressafra 2012; safra 2012/13 e entressafra 2013. Sendo o solo na área experimental classificado como Planossolo Háplico (STRECK et al., 2008). Os dados referentes à precipitação pluvial, durante o período de avaliação, encontram-se nas Figuras 9a e 10a, tendo sido fornecidos pela Estação Agroclimatológica de Pelotas, localizada na EMBRAPA Clima Temperado, na Estação Terras Baixas (ETB).

Os tratamentos compreenderam dois sistemas de irrigação para o arroz (Inundação e Aspersão), selecionados de experimentos mais amplos, delineados em blocos ao acaso com cinco repetições. As unidades experimentais apresentaram 100 m² (10 m x 10 m). Também foi realizada a avaliação numa área natural, a descrição de todos os tratamentos avaliados é apresentada na sequência:

- Sistema de Irrigação por Inundação (INUNDAÇÃO): irrigação por inundação iniciada quando as plantas de arroz se encontravam no estágio de quatro folhas (V4), com manutenção de uma lâmina de água de cerca de 7,5 cm até a maturação dos grãos, correspondendo ao estágio R9, segundo a escala de Counce et al. (2000). E na entressafra de 2012 com semeadura de azevém e na entressafra de 2013 a área foi mantida em repouso.

- Sistema de Irrigação por Aspersão (ASPERSÃO): irrigação do arroz por aspersão, em sistema linear, da emergência à maturação de colheita, sempre que a leitura média da tensão de água no solo, medida por sensores Watermark[®], atingia 0,020 Mpa (safra 2011/12) e 0,010 Mpa (safra 2012/13), essa alteração de critério para irrigar deu-se pelo fato do arroz não ter desenvolvido satisfatoriamente quando se esperava a tensão do solo atingir 0,020 Mpa, por isso na safra seguinte optou-se em entrar com a irrigação

sempre que a tensão atingia 0,010 Mpa (e não mais 0,020 Mpa). E nas duas entressafras (2012 e 2013) houve a semeadura de nabo forrageiro.

- Área Natural: consistiu em avaliar uma área de mesmo tipo de solo, não alterada antropogenicamente, localizada próxima às demais áreas experimentais, sendo utilizada como referência para a avaliação das emissões de GEE. Essa área estava localizada dentro de um campo e esporadicamente sofria o pastoreio pelo gado que ali estava. E por não dispor de um sistema de drenagem, em certos momentos essa área natural ficava submersa, ou seja, havia lâmina de água sobre a área.

4.3.1 Condução dos Experimentos durante as Safras 2011/2012 e 2012/13 e também nas Entressafras:

a) Irrigação por Inundação (INUNDAÇÃO):

Safra 2011/2012

A semeadura do arroz, cultivar BRS Querência, foi realizada no dia 02 de novembro de 2011, utilizando-se uma densidade de 120 kg ha⁻¹ de sementes e, a emergência do arroz ocorreu no dia 12 de novembro de 2011 (50% de emergência). A análise do solo na camada de 0-20 cm é apresentada na Tabela 1, sendo que a calagem foi dispensada. Como adubação básica de semeadura, aplicaram-se 250 kg ha⁻¹ da formulação 5-20-20, de forma localizada nos sulcos de semeadura. Em cobertura, foram aplicados 100 kg de N (222 kg ha⁻¹ de ureia), parcelados em duas aplicações, 55 kg ha⁻¹ de N, no estágio de quatro folhas (V4), e 45 kg ha⁻¹ de N, na iniciação da panícula (R0). A primeira adubação nitrogenada em cobertura no interior de todos os coletores de GEE foi feita sobre a lâmina de água no dia 12 de dezembro de 2011, sendo 11 dias após o início da irrigação (01 de dezembro de 2011). Já a segunda adubação nitrogenada foi realizada no dia 02 de janeiro de 2012, sendo sobre uma lâmina de água não circulante. E a colheita do arroz foi realizada no dia 19 de março de 2012.

Entressafra 2012

O período da entressafra estendeu-se do final de março de 2012 até a metade de novembro de 2012. A colheita do arroz havia sido realizada no dia 19 de março de 2012 e após a resteva do arroz foi mantida até maio, quando no dia 11 de maio de 2012 foi realizado um preparo do solo com uma grade niveladora, para que ocorresse a semeadura do azevém naquela área. As coletas de GEE foram realizadas no mesmo

local até o dia 13 de novembro em intervalos regulares, de aproximadamente quatorze dias.

Safra 2012/2013

A semeadura do arroz, cultivar BRS Pampa, foi realizada no dia 01 de dezembro de 2012, utilizando-se uma densidade de 110 kg ha^{-1} de sementes e, a emergência do arroz ocorreu no dia 12 de dezembro de 2012 (50% de emergência). A irrigação foi lenta no início, com estabelecimento definitivo da lâmina de irrigação em 31 de dezembro de 2012. Como adubação básica de semeadura, aplicaram-se 313 kg ha^{-1} da formulação 5-20-20, de forma localizada nos sulcos de semeadura. Em cobertura, foram aplicados 105 kg de N (233 kg ha^{-1} de ureia), parcelados em duas aplicações, 55 kg ha^{-1} de N, no estágio de quatro folhas (V4) (08 de janeiro de 2013), e 50 kg ha^{-1} de N, na iniciação da panícula (R0) (28 de janeiro de 2013), sendo que as duas aplicações nitrogenadas foram realizadas sobre uma lâmina de água não circulante. E a colheita do arroz foi realizada no dia 17 de abril de 2013.

Entressafra 2013

O período da entressafra de 2013 estendeu-se do final de abril (22-04-13) até o final de outubro (29-10-14). Sendo que o arroz havia sido colhido na metade de abril de 2013 e a área avaliada foi mantida em pousio por todo o período da entressafra de 2013.

b) Irrigação por Aspersão (ASPERSÃO):

Safra 2011/2012

O arroz foi semeado no sistema de plantio direto no dia 04 de novembro de 2011, utilizando-se, também, a cultivar BRS Querência, na densidade de 90 kg ha^{-1} de sementes. A análise do solo na camada de 0-20 cm é apresentada na Tabela 1, sendo que foram aplicados $2,0 \text{ t ha}^{-1}$ de calcário dolomítico (PRNT=100%) em superfície, para correção da acidez, com três meses de antecedência da semeadura do arroz. E foram aplicados, como adubação básica de semeadura, 300 kg ha^{-1} da formulação 5-20-20. Em cobertura, foram aplicados 105 kg de N (233 kg ha^{-1} de ureia), parcelados em duas aplicações, 65 kg ha^{-1} de N (144 kg ha^{-1} de ureia) e 30 kg ha^{-1} de K_2O , como cloreto de potássio, no estágio de cinco folhas (V5), e 40 kg ha^{-1} de N (89 kg ha^{-1} de ureia), na iniciação da panícula (R0). Neste sistema, durante todo o período de cultivo, a irrigação do arroz foi realizada sempre que a leitura média da tensão de água no solo, medida por sensores Watermark[®], instalados a 10 cm de profundidade, atingia o valor de 0,020 MPa. Os demais tratos culturais para ambos os sistemas seguiram indicações da

pesquisa para a cultura do arroz irrigado. A colheita dos grãos de arroz ocorreu no dia 28 de março de 2012.

Entressafra 2012

Na entressafra não houve revolvimento do solo e o nabo forrageiro foi utilizado como planta de cobertura.

Safra 2012/2013

O arroz foi semeado no sistema de plantio direto dia 15 de outubro de 2012, utilizando-se, a cultivar BRS Pampa, na densidade de 95 kg ha^{-1} de sementes. Foram aplicados, como adubação básica de semeadura, 350 kg ha^{-1} de da formulação 5-20-20. Em cobertura, foram aplicados, $58,5 \text{ kg ha}^{-1}$ de N (130 kg ha^{-1} de ureia) no estágio de cinco folhas (V5), 30 kg ha^{-1} de N ($66,7 \text{ kg ha}^{-1}$ de ureia), no estágio de oito folhas (V8), e $58,5 \text{ kg ha}^{-1}$ de N (130 kg ha^{-1} de ureia) na iniciação da panícula (R0). Nesse sistema, durante todo o período de cultivo, a irrigação do arroz foi realizada sempre que a leitura média da tensão de água no solo, medida por sensores Watermark[®], instalados a 10 cm de profundidade, atingia o valor de 0,010 MPa. Os demais tratos culturais para ambos os sistemas seguiram indicações da pesquisa para a cultura do arroz irrigado. A colheita dos grãos de arroz ocorreu no dia 19 de março de 2013.

Entressafra 2013

Na entressafra não houve revolvimento do solo e o nabo forrageiro foi utilizado como planta de cobertura.

c) Área Natural:

Consistiu em avaliar uma área em condição natural, ou seja, sem histórico de cultivo, conforme já descrito anteriormente.

Tabela 1. Caracterização prévia dos solos nos três tratamentos (Inundação, Aspersão e Área Natural) avaliados, sendo que todos são Planossolos.

| Tratamento | INUNDAÇÃO | | ASPERSÃO | | ÁREA NATURAL | |
|--|------------------|--------------|-----------------|--------------|---------------------|--------------|
| Profundidade (cm) | 0-10 | 10-20 | 0-10 | 10-20 | 0-10 | 10-20 |
| Argila (g kg ⁻¹) | 185 | 175 | 172 | 172 | 199 | 198 |
| Silte (g kg ⁻¹) | 330 | 345 | 314 | 330 | 231 | 242 |
| Areia (g kg ⁻¹) | 485 | 480 | 514 | 498 | 570 | 560 |
| pH (SMP) | 6,1 | 6,3 | 6,3 | 6,4 | 5,0 | 4,9 |
| pH (H ₂ O) | 6,0 | 6,2 | 5,6 | 5,8 | 4,4 | 4,3 |
| Carbono total (g kg ⁻¹) | 7,9 | 7,9 | – | – | 14,8 | 16,9 |
| Nitrogênio total (g kg ⁻¹) | 0,65 | 0,65 | – | – | 0,30 | 0,65 |
| Matéria Orgânica (%) | 1,2 | 1,1 | 1,3 | 1,3 | 2,4 | 2,7 |

4.3.2 Amostragem e Análise dos Gases

As amostragens de ar para determinação das emissões de CH₄ e N₂O foi realizada em três repetições dos tratamentos avaliados. As coletas de ar foram realizadas do início novembro de 2011 (logo após a semeadura do arroz) até o final de outubro de 2013, em intervalos regulares, de aproximadamente sete dias nas safras e de intervalos de quatorze dias nas entressafras.

A amostragem dos gases foi realizada por meio do método da câmara estática fechada (MOSIER, 1989), de acordo com os procedimentos padronizados pelo Comitê de Cultivo de Arroz e Fluxo de Gases (RICE), como parte do Projeto “International Global Atmospheric Chemistry” (IGAC).

A câmara estática fechada foi constituída por uma base quadrada (63 cm x 63 cm) e 30 cm de altura, em alumínio, que permanecia fixa no solo durante toda a safra do arroz e servia de suporte para a colocação da câmara (topo) no momento das coletas (Figura 16a e 16b). Na parte superior da câmara (topo), dois ventiladores faziam a homogeneização do ar no interior da câmara durante 30 segundos antes de cada amostragem, evitando a formação de gradientes de concentração, enquanto que um termômetro digital com precisão de 0,1° C registrava a temperatura do interior da câmara. Em lados opostos das bases, dois orifícios ($\phi = 2,6$ cm) permitiam a circulação da água de irrigação quando as coletas de ar não estavam sendo realizadas. Durante as coletas, estes orifícios foram vedados com rolhas de borracha.

As bases foram instaladas no solo após a semeadura do arroz, sendo utilizada uma base para cada uma das três repetições dos tratamentos. A frequência de coletas foi

semanal no período de crescimento do arroz (de novembro a março). Em cada coleta, as câmaras de alumínio eram dispostas sobre as bases, sendo que o fechamento hermético do conjunto câmara-base era obtido pela colocação de água na canaleta da base na qual a câmara (topo) se encontrava apoiada. À medida que as plantas de arroz cresciam, foram utilizados extensores de alumínio inseridos entre a base e o topo da câmara.

As amostragens de ar foram realizadas durante o período da manhã, no intervalo entre 9 e 12 horas, pois segundo Costa et al. (2008b) os valores obtidos nesse período representam as emissões diárias de GEE no Sul do Brasil. Sendo que as amostragens de ar foram realizadas em tempos pré-determinados (0, 5, 10 e 20 minutos) após o fechamento da câmara estática. As amostras de ar foram coletadas com seringas de polipropileno de 20 mL, acopladas na parte superior do topo. Em cada seringa foi adaptada uma válvula de três vias, que era fechada imediatamente após a coleta, sendo as seringas acondicionadas em caixas de isopor contendo gelo em gel para resfriamento, na safra 2011/12 essas caixas foram lacradas e transportadas para análise no Laboratório de Biogeoquímica Ambiental do Departamento de Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, já na safra 2012/13 as amostras foram transferidas para extaneirs de vidro, para serem analisadas alguns dias mais tarde.

Por ocasião das adubações nitrogenadas em cobertura, foram realizadas coletas com maior frequência (aproximadamente a cada 2 dias), por um período de uma semana após a aplicação do fertilizante (início do perfilhamento e na iniciação da panícula), a fim de se obter um maior detalhamento das emissões dos GEE nesse período.

As amostras de ar foram analisadas e as concentrações de N_2O e CH_4 foram determinadas por cromatografia gasosa, em equipamento Shimadzu GC-2014 (modelo “Greenhouse”). O equipamento consta de três colunas empacotadas, sendo o N_2O quantificado via detector de captura de elétrons (ECD) a 325 °C, e o CH_4 quantificado no detector de ionização de chama (FID) a 250 °C.

Os fluxos de CH_4 e N_2O foram estimados utilizando-se a equação 1:

$$f = (\Delta Q / \Delta t) \cdot (PV / RT) \cdot (M / A) \quad \text{(Equação 1)}$$

onde, f é o fluxo de N_2O ou CH_4 (μg de N_2O ou CH_4 $m^{-2} h^{-1}$), Q é a quantidade do gás (μmol mol^{-1}) na câmara no momento da coleta, P é a pressão atmosférica (atm) no interior da câmara - assumida como 1 atm, V é o volume da câmara (L), R é a constante dos gases ideais (0,08205 atm. L $mol^{-1} K^{-1}$), T é a temperatura dentro da câmara no momento da coleta (K) e M é a massa molar do gás (μg mol^{-1}) e A é a área

da base da câmara (m^2). A taxa de aumento do gás no interior da câmara foi obtida pelo coeficiente angular da equação da reta ajustada entre a concentração dos gases e o tempo. A partir dos valores de fluxo calculados foram estimadas as emissões diárias, e a emissão total do período avaliado foi calculada pela integração da área sob a curva obtida pela interpolação dos valores diários de emissão de N_2O e de CH_4 do solo (GOMES et al., 2009).

Com base na emissão acumulada de CH_4 e de N_2O e considerando o potencial de aquecimento global (PAG) de cada gás em relação ao dióxido de carbono, foram calculadas as emissões em quantidades de CO_2 equivalente, cuja soma foi denominada de Potencial de Aquecimento Global parcial (PAGp). Sendo que os valores de PAG são de 25 vezes para o CH_4 e de 298 para o N_2O , considerando um tempo de permanência na atmosfera de 100 anos (FORSTER et al., 2007).

4.3.3 Parâmetros de Planta e Volume de Água Utilizado

O acompanhamento dos estádios de desenvolvimento das plantas de arroz foi realizado utilizando-se, como referência, a escala de Counce et al. (2000).

A produtividade de grãos do arroz foi determinada na maturação de colheita (estádio R9). A produtividade de grãos foi determinada considerando-se as plantas de cinco subamostras 4 m^2 coletadas de cada unidade experimental. O material colhido foi trilhado, seco e pesado, convertendo-se os dados para 130 g kg^{-1} de umidade.

O volume de água aplicado ao arroz foi medido por meio de hidrômetros individuais, com acompanhamento diário das quantidades requeridas.

4.3.4 Análise Estatística

Os fluxos diários e a emissão total dos GEE foram analisados de forma descritiva (média \pm desvio padrão). Os dados de produtividade de grãos e de água aplicada foram submetidos à análise de variância, comparando-se as médias dos tratamentos pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

4.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.4.1 Fluxo de Metano e Óxido Nitroso do Solo

Os picos das emissões de CH_4 no tratamento irrigado por inundação contínua

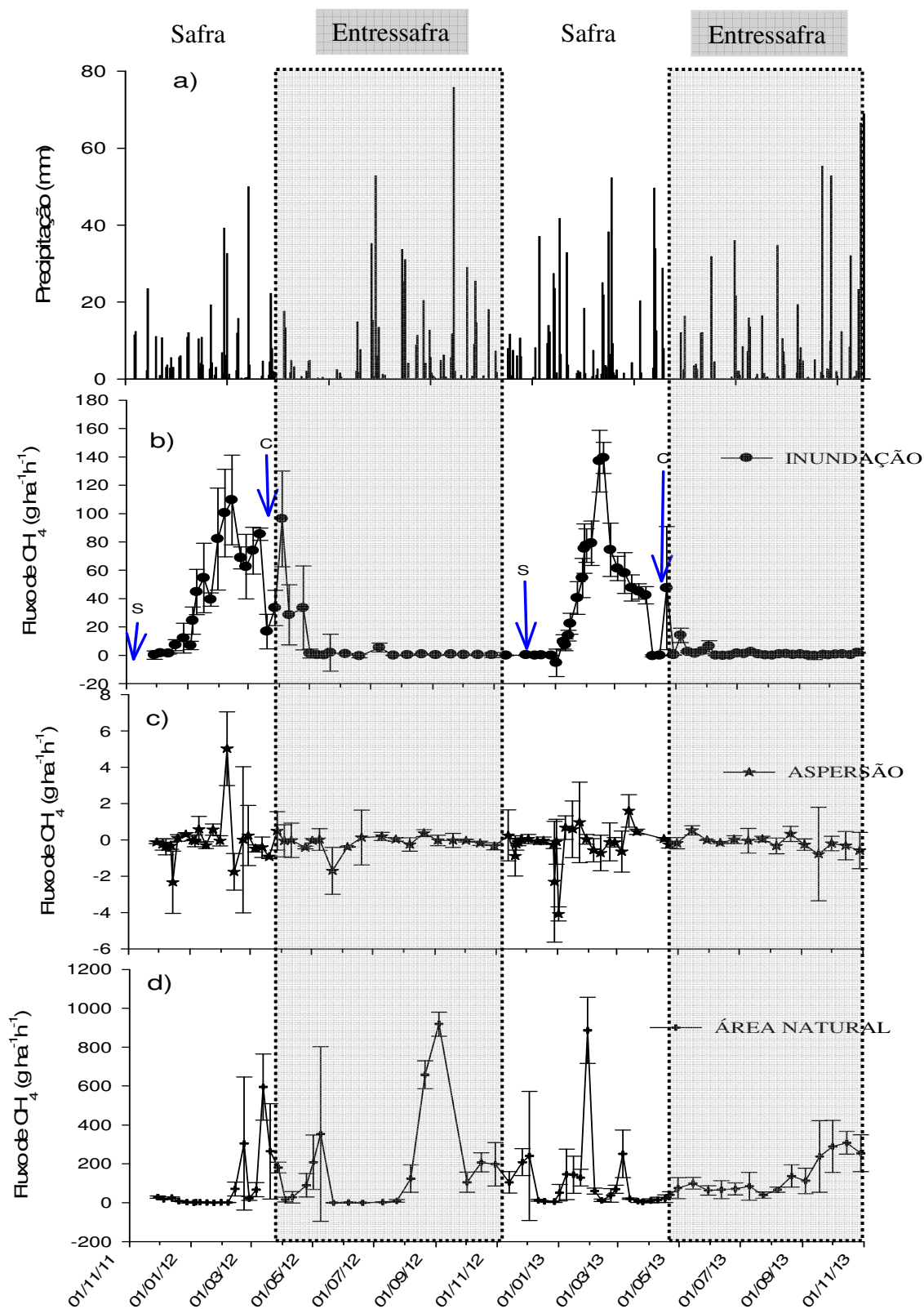


Figura 9. Precipitação (a) e fluxos de CH_4 em um Planossolo cultivado com arroz irrigado por Inundação (b) e por Aspersão (c) por um período de dois anos, comparado com uma Área Natural (d). S = semeadura; C = colheita. Barras verticais representam o desvio padrão da média.

do solo foram verificados nas safras do arroz, sendo, na safra 2011/12, de $110\text{g CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (104 dias após a semeadura – 14/02/2012) e na safra 2012/13, de $139\text{g CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (79 dias após a semeadura – 18/02/2013) (Fig. 6b), coincidente com os estágios de florescimento e de emborrachamento do arroz, respectivamente. Segundo Pusatjapong et al. (2003), as maiores taxas de emissão de CH_4 ocorrem nessa fase reprodutiva, devido ao aumento da exsudação de compostos orgânicos decorrente da morte de raízes das plantas. No caso da irrigação por aspersão praticamente não houve emissão de CH_4 , sendo que os maiores valores de $5\text{g CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ na safra 2011/12 (95 dias após a semeadura – 07/02/2012) e de $1,6\text{g CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ na safra 2012/13 (149 dias após a semeadura – 13/03/2013) (Fig. 6c) ocorreram numa época em que o solo apresentava umidade superior à saturação, devido à ocorrência de período de elevada precipitação.

Na área natural, ocorreram picos que atingiram $595\text{g CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (período correspondente à safra 2011/12), $819\text{g CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (período correspondente à entressafra 2012) e de $886\text{g CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (período correspondente à safra 2012/13) (Fig. 6d). As emissões na área natural foram bastante variáveis e se relacionaram com as condições de umidade do solo no período da coleta. E por apresentar um maior estoque de carbono (Tabela 1), provavelmente apresentou as maiores emissões de CH_4 , comparado aos outros dois tratamentos.

No sistema de irrigação por aspersão, os fluxos de CH_4 normalmente foram baixos ou negativos, esse fato pode ser explicado pelas condições de solo drenado, no qual a presença do oxigênio inibe a produção deste gás, sendo que estimula o crescimento e a atividade de micro-organismos metanotróficos, mantendo os níveis de CH_4 muito baixos em comparação com o tratamento com irrigação contínua (WELLER et al., 2015).

Nas entressafras (2012 e 2013) praticamente não houve emissão de CH_4 nos dois sistemas de irrigação avaliados (Inundação e Aspersão) (Fig. 6b e 6c), já na área natural houve picos de emissão de CH_4 (Fig. 6d), provavelmente por essa área ter saturado e/ou até inundado em certos períodos devido à ocorrência de elevadas precipitações (Fig. 6a) e não dispor de sistema de drenagem.

As emissões de N_2O foram maiores no tratamento em que foi utilizado o sistema de irrigação por aspersão, comparado com os outros tratamentos. Os maiores fluxos de N_2O ocorreram durante a fase inicial dos cultivos, no máximo até 77 dias após a semeadura (DAS) (Figura 10c), possivelmente devido às maiores concentrações de N no solo, decorrentes das adubações nitrogenadas. Nas safras 2011-12 e 2012-13 a 1ª

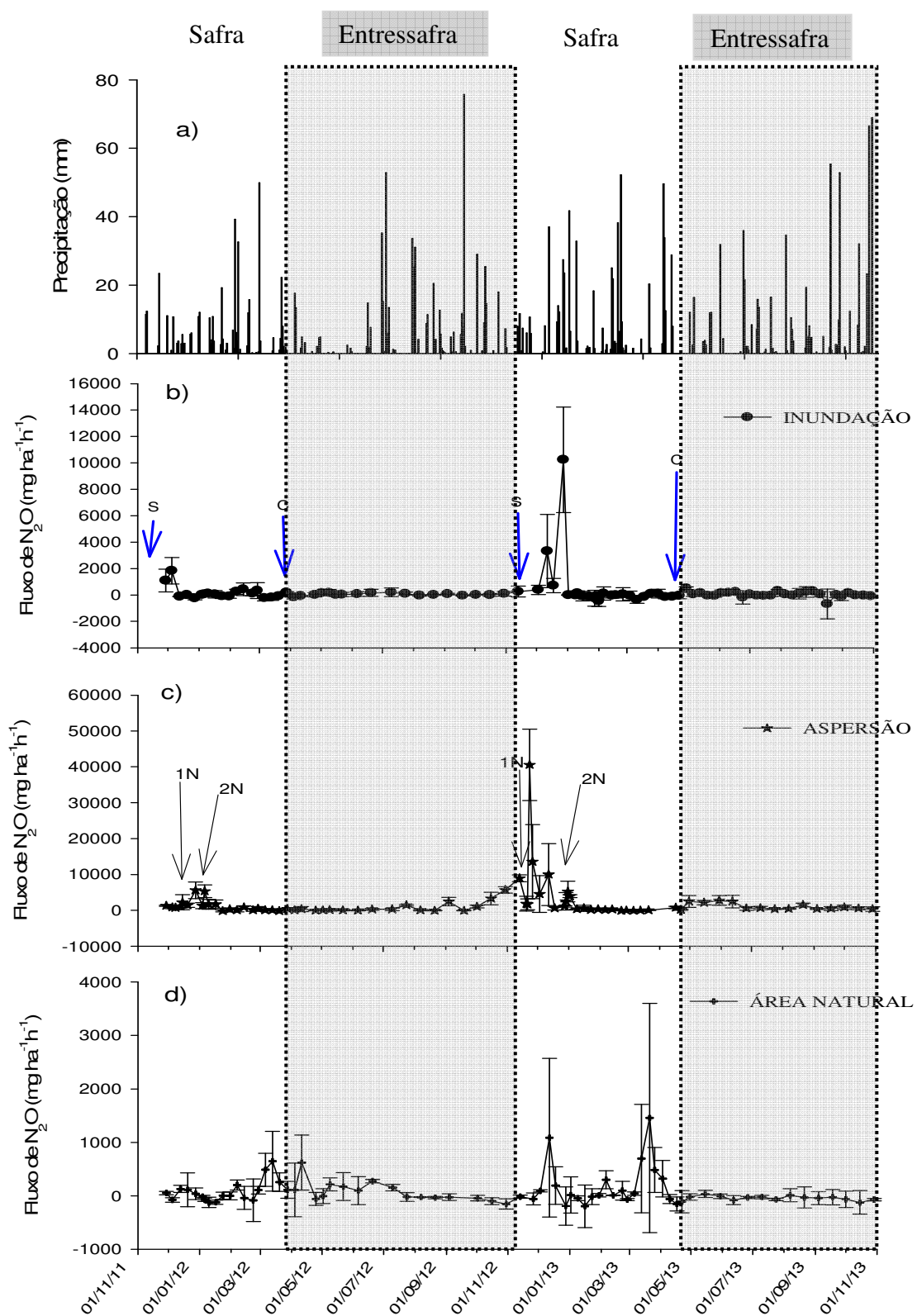


Figura 10. Precipitação (a) e fluxos de N_2O em um Planossolo cultivado com arroz irrigado por Inundação (b) e por Aspersão (c) por um período de dois anos, comparado com uma Área Natural (d). S = semeadura; 1ª e 2ª N = adubações de cobertura de N; C = colheita. Barras verticais representam o desvio padrão da média.

adubação nitrogenada ocorreu 37 e 34 DAS e a 2ª adubação nitrogenada ocorreu 62 e 72 DAS, respectivamente (Figura 10c). E nas entressafras também houve fluxos de N_2O , é provável que esse maior fluxo no tratamento por Aspersão pode ter ocorrido devido à decomposição do nabo forrageiro, que foi usada como planta de cobertura no período da entressafra. Além disso, o sistema de preparo nesse tratamento foi o plantio direto, esse sistema pode determinar um adensamento do solo e determinar microssítios anaeróbios, onde o nitrogênio nítrico do solo está sujeito a perdas por desnitrificação.

No sistema de inundação contínua, pode-se observar que as emissões de N_2O também ocorreram na fase inicial dos cultivos (Figura 10b), mas nesse caso parece que não houve muita relação com as adubações nitrogenadas, mas sim, com a inundação do solo, pois nas duas safras os picos das emissões ocorreram antes das adubações nitrogenadas, no período em que estava ocorrendo a entrada da água. Já no restante do período das safras e das entressafras, as emissões não foram muito significativas. Wesz (2012) também encontrou valores praticamente nulos em arroz irrigado por Inundação no mesmo solo do presente estudo. No sistema de inundação contínua, a manutenção da lâmina de água cria condições estritamente anaeróbias, as quais restringem as emissões de N_2O (TOWPRAYOON et al., 2005), de forma que os fluxos se aproximam de zero (JOHNSON-BEEBOUT et al., 2009; LIU et al., 2010) ou, até mesmo, são negativos (CAI et al., 1997; HOU et al., 2000). Em trabalho conduzido por Iida et al. (2007), sob condições controladas, foi constatado que a permanência de uma lâmina baixa de água (<2 cm) sobre o solo foi capaz de suprimir as emissões de N_2O e nem mesmo as adubações nitrogenadas em cobertura resultaram em aumento nas taxas de emissão de N_2O do solo sob lâmina de água permanente.

Na área natural, as emissões de N_2O do solo foram relativamente baixas em quase todo o período avaliado, não superando $1000 \text{ mg ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (Figura 10d). Apenas em duas coletas as emissões foram um pouco maiores, atingindo $1088 \text{ mg ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (12/12/2012) e $1456 \text{ mg ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (21/03/2013). Isso provavelmente ocorreu devido a alta relação C/N no solo da área natural, apresentando mais que o dobro em relação a área com sistema de inundação contínua (Tabela 1), resíduos com alta relação C:N podem estimular a imobilização microbiana no N, reduzindo a sua disponibilidade para os processos envolvidos na produção de N_2O (ROSA et al., 2011; COPETTI, 2015).

4.4.2 Emissão Total de CH₄, de N₂O e o Potencial de Aquecimento Global parcial (PAGp)

Com relação à emissão total de CH₄, verifica-se que o cultivo do arroz irrigado por aspersão implantado através de plantio direto, apresentou um efeito positivo na mitigação das emissões desse gás do solo, quando comparado com o sistema de inundação contínua, ou mesmo quando comparado com a área natural não cultivada (Figuras: 11 e 13a), apresentando emissão total acumulada de CH₄ negativa (-1,35 kg CH₄ ha⁻¹), ou seja, ocorreu “absorção” do gás. Em solos oxidados, Hanson & Hanson (1996) também observaram que a utilização de sistemas conservacionistas de manejo, como o plantio direto, pode determinar a gradativa recuperação da capacidade do solo em absorver CH₄, pelo estabelecimento de condições mais favoráveis à atividade da microbiota metanotrófica, com oxidação do CH₄ a CO₂ e imobilização de carbono na biomassa.

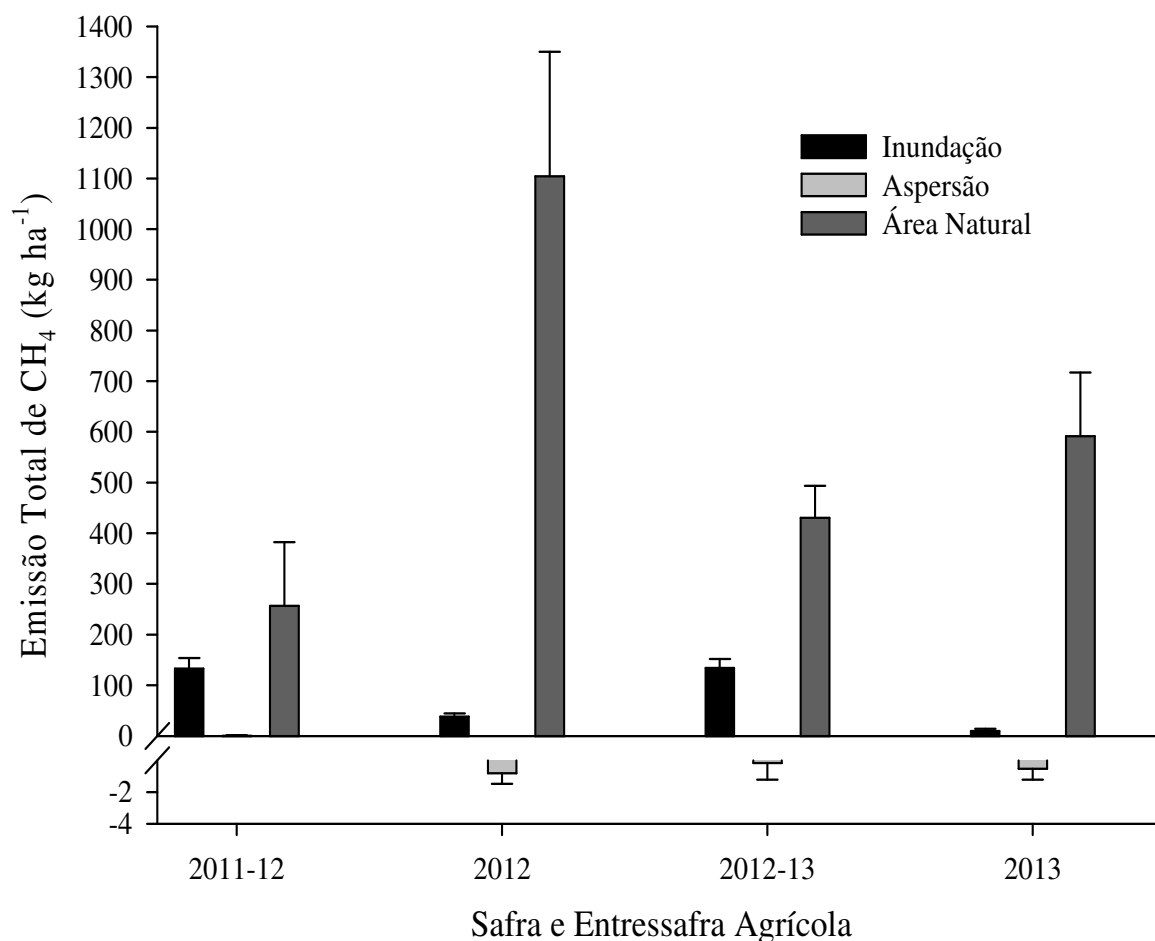


Figura 11. Emissão total de CH₄ em três tratamentos (Inundação, Aspersão e Área Natural) por um período de dois anos completos. Barras verticais representam o desvio padrão da média.

Ao longo dos dois anos de avaliação o arroz irrigado pelo sistema de inundação contínua apresentou uma emissão total de CH_4 87% menor (316 kg ha^{-1}) que a da área natural, a qual apresentou uma emissão de 2383 kg ha^{-1} de CH_4 (Figuras: 11 e 13a). Já a maior emissão de CH_4 na área natural pode ter ocorrido devido ao fato dessa área possuir um maior estoque de C, comparado com a área cultivada com arroz irrigado por alagamento, que já não possui mais um estoque de C tão elevado (Tabela 1), devido aos vários anos de cultivo.

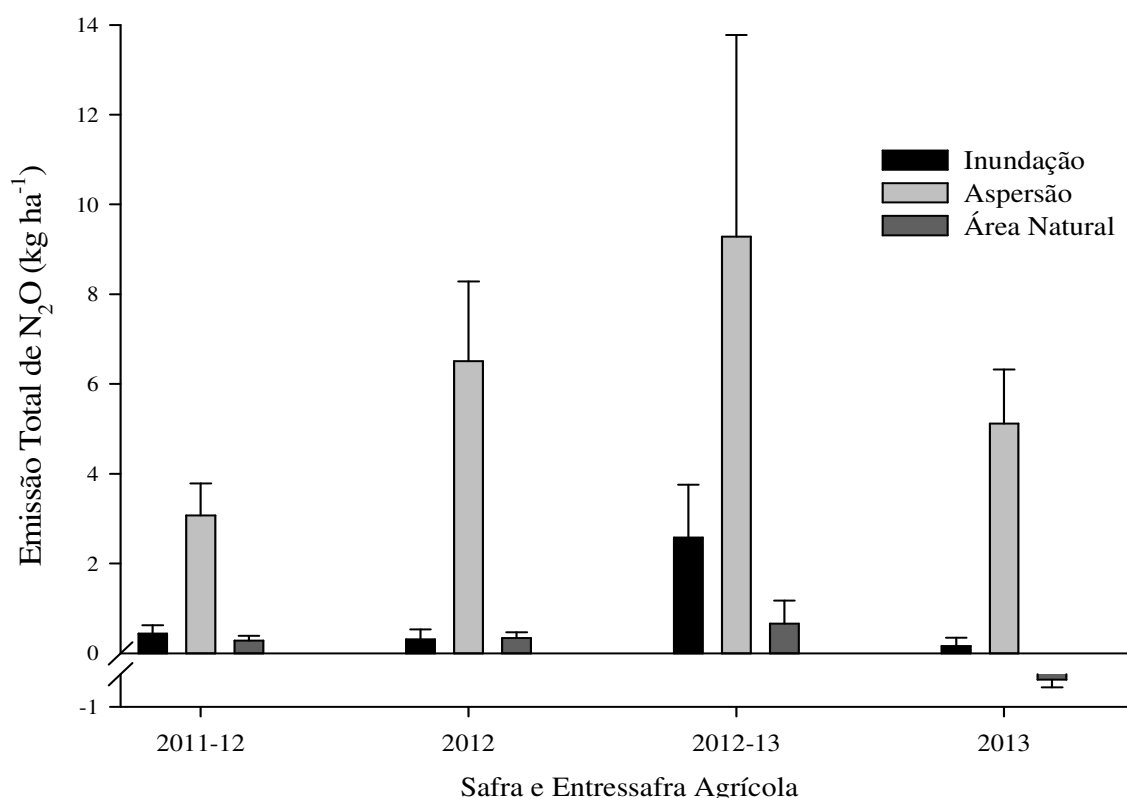


Figura 12. Emissão total de N_2O em três tratamentos (Inundação, Aspersão e Área Natural) por um período de dois anos completos. Barras verticais representam o desvio padrão da média.

O sistema de irrigação por aspersão otimiza o uso da água na produção de arroz (PARFITT et al., 2011), mas por outro lado, tende a potencializar a emissão de N_2O do solo. Conforme se observa nas Figuras 12 e 13b, a emissão total de N_2O durante o período de dois anos de avaliação foi quase sete vezes superior no tratamento irrigado por Aspersão ($24 \text{ kg N}_2\text{O ha}^{-1}$), comparativamente ao sistema de Inundação ($3,5 \text{ kg N}_2\text{O ha}^{-1}$) e foi mais de 21 vezes superior em relação à área natural ($1,11 \text{ kg N}_2\text{O ha}^{-1}$). É provável que no sistema irrigado por aspersão haja uma alternância das condições de oxidação/redução, favorecendo os processos alternados de nitrificação e desnitrificação, intensificando a produção e a emissão de N_2O , principalmente nos períodos próximos às

adubações nitrogenadas em cobertura. Observa-se ainda que no tratamento com Aspersão, a emissão total de N_2O foi maior na safra 2012-13 em comparação com a safra anterior, isso provavelmente ocorreu devido à irrigação ter sido realizada sempre que a leitura média da tensão de água no solo atingia o valor de 0,010 Mpa (e não mais 0,020 Mpa, como na safra anterior). Quando se realiza a irrigação com maior frequência e se deixa o solo mais perto das condições de saturação, ocorre maior possibilidade de ocorrerem situações alternância das condições de oxidação/redução.

O sistema de inundação contínua apresentou os menores valores de emissão total de N_2O em relação ao sistema de irrigação por aspersão. Por não apresentar condições favoráveis à ocorrência dos processos de nitrificação e desnitrificação, provavelmente a maior parte das perdas de N do sistema tenham ocorrido na forma de N_2 . Sob condições prolongadas de alagamento, o N_2O presente no solo pode ser biologicamente reduzido a N_2 , o que contribui, inclusive, para a mitigação das emissões de N_2O do solo (REDDY & DELAUNE, 2008).

Como mencionado, na área natural, a emissão total de N_2O do solo foi bastante baixa, isso pode ter ocorrido devido ao fato de essa área possuir um grande estoque de C e, portanto, estar sujeita à imobilização de N em maior magnitude.

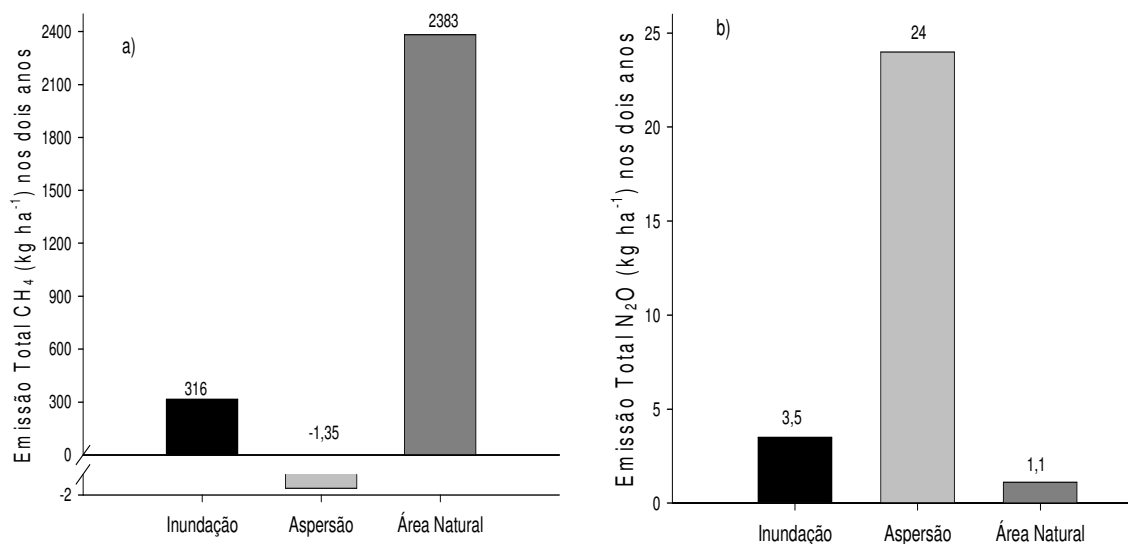


Figura 13. Emissão total acumulada de CH_4 (a) e N_2O (b) em três tratamentos (Inundação, Aspersão e Área Natural) por um período de dois anos completos.

Na Figura 14 são apresentados os valores de PAGp dos tratamentos avaliados durante duas safras e duas entressafras (dois anos completos). O sistema de irrigação

por aspersão apresentou PAGp de 7112 kg CO₂ equiv. ha⁻¹ (100% na forma de N₂O), o que significa uma redução de 21% em relação ao sistema de inundação contínua, que apresentou um PAGp de 8934 kg CO₂ equiv. ha⁻¹ (88% na forma de CH₄). A redução no PAGp do sistema irrigado por aspersão foi 88% menor em relação a área natural, que apresentou um PAGp de 59908 kg CO₂ equiv. ha⁻¹ (sendo 99,5% na forma de CH₄).

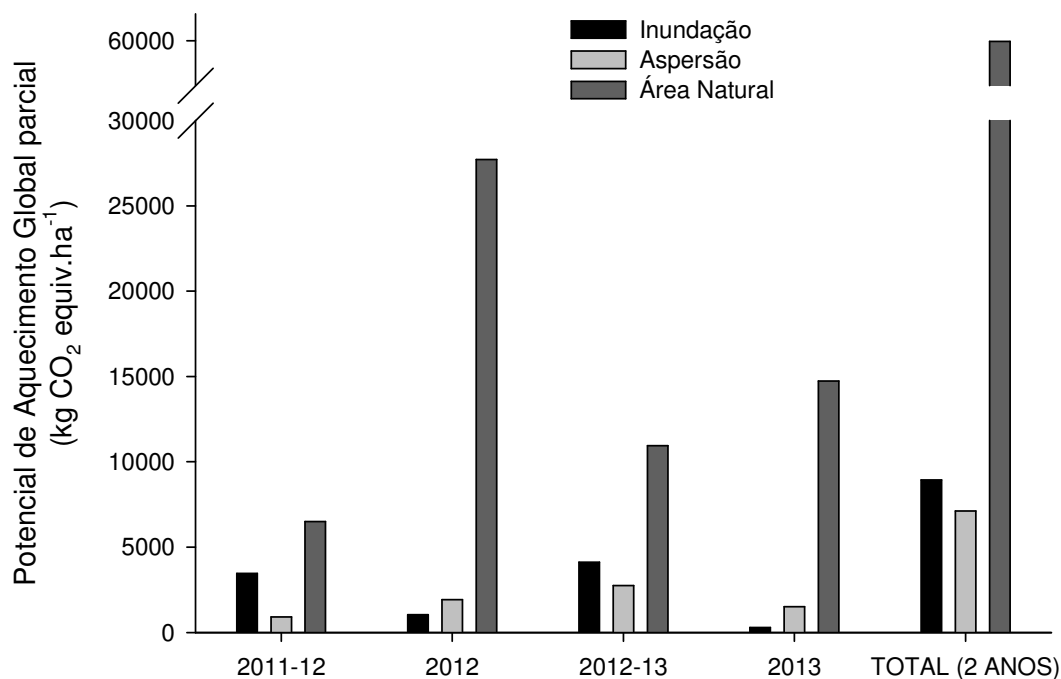


Figura 14. Potencial de Aquecimento Global parcial (PAGp) em três tratamentos (Inundação, Aspersão e Área Natural) por um período de dois anos completos.

4.4.3 Produtividades, Volume de Água Aplicado e Eficiência do Uso da Água

Na Figura 15a e 15d são apresentados as produtividades do arroz nas duas safras avaliadas, sendo que o tratamento com inundação contínua sempre foi superior (9224 kg ha⁻¹ safra 2011/12 e 8192 kg ha⁻¹ safra 2012/13) em relação ao tratamento com irrigação por aspersão (6414 kg ha⁻¹ safra 2011/12 e 6650 kg ha⁻¹ safra 2012/13).

Em relação ao volume de água aplicado, observa-se que nas duas safras no tratamento com inundação contínua foi aplicada a maior quantidade de água em relação ao tratamento Aspersão. Na safra 2011/12 foram aplicados 5544 m³ ha⁻¹ no tratamento Inundação, já no tratamento Aspersão foram aplicados 2790 m³ ha⁻¹ (mais a precipitação do período de 4085 m³ ha⁻¹), ou seja, 49,5% menos água em relação ao tratamento

Inundação. Já na safra 2012/13 foram aplicados $5534 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ no tratamento Inundação e $5340 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ no tratamento Aspersão (mais a precipitação do período de $5072 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$), ou seja, uma redução de 3,5% no volume de água aplicado (Figura 15b e 15e).

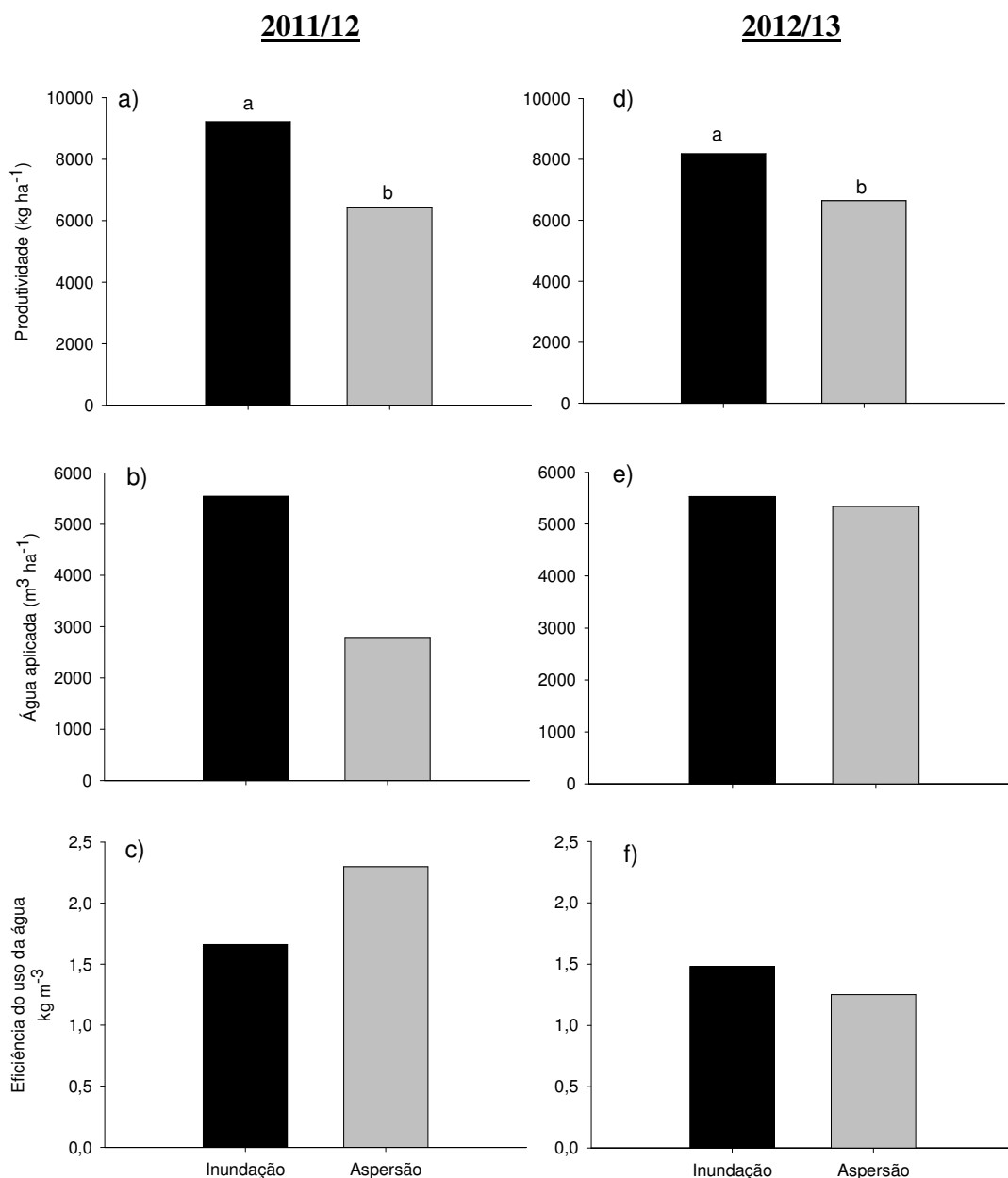


Figura 15. Produtividade do arroz (“a” e “d”), volume de água aplicado (“b” e “e”) e eficiência do uso da água (“c” e “f”) em dois tratamentos (Inundação e Aspersão) nas safras 2011-12 e 2012-13. Colunas com mesma letra não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Quando se compara o mesmo tratamento (Inundação) nas duas safras observamos que a quantidade de água aplicada foi praticamente a mesma, sendo de 5544 e de $5534 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, mas essas quantidades de água são relativamente baixas quando

comparados com outros estudos com inundação contínua, por exemplo, em um estudo realizado em Pelotas na safra 2011/12 o uso total de água foi de $8770 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ (PINTO, 2015) e tem vários outros estudos que relatam volumes de água aplicados bem maiores do que os encontrados no presente estudo. Mas isso provavelmente aconteceu devido ao manejo de água realizado nesse nosso estudo, tanto no tratamento com irrigação contínua quanto no tratamento irrigado por aspersão, tentou-se aproveitar ao máximo a água oriunda das precipitações.

No tratamento irrigado por aspersão observa-se que na segunda safra o volume de água aplicado foi bem maior ($5340 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) em relação à primeira safra ($2790 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$). Isso ocorreu pelo fato de que na primeira safra (2011/12) a irrigação do arroz foi realizada sempre que a leitura média da tensão de água no solo, medida por sensores Watermark[®], atingia o valor de 0,020 Mpa. Já na segunda safra (2012/13) a irrigação era mais frequente, ou seja, era realizada sempre que a leitura média da tensão de água no solo, atingia o valor de 0,010 MPa.

Em relação à eficiência do uso da água, essa foi maior no tratamento irrigado por aspersão na safra 2011/12, mas na safra 2012/13 foi maior no tratamento irrigado de forma contínua (Figura 15c e 15f).

Tabela 2. Índice PAGp/Produtividade de grãos ($\text{kg CO}_2 \text{ equiv.kg arroz}^{-1}$) de dois tratamentos (Inundação e Aspersão).

| Tratamentos | Safra 2011/12 | Safra 2012/13 | TOTAL (2 anos) |
|-------------|---|---------------|----------------|
| | (kg $\text{CO}_2 \text{ equiv.kg arroz}^{-1}$) | | |
| Inundação | 0,37 | 0,50 | 1,02 |
| Aspersão | 0,14 | 0,41 | 1,08 |

Outro aspecto interessante que se observou, foi que, se fizermos a comparação do índice de PAGp/Produtividade de grãos ($\text{kg CO}_2 \text{ equiv.kg arroz}^{-1}$), entre os dois tratamentos (Inundação e Aspersão), nas safras observamos que o tratamento Aspersão tem um melhor resultado, ou seja, produz arroz com uma menor emissão de $\text{CO}_2 \text{ equiv.kg arroz}^{-1}$ (Tabela 2). Mas se considerarmos o total nos dois anos (incluindo as entressafras), observamos que o tratamento Aspersão tem um desempenho muito similar (1,08) com o tratamento Inundação (1,02). Esse comportamento do tratamento irrigado por Aspersão se deve principalmente pelas elevadas emissões de N_2O nas entressafras.

4.5 CONCLUSÃO

A irrigação por aspersão mitiga as emissões de metano do solo em cultivo de arroz, porém potencializa as emissões de óxido nitroso. Ainda assim esse sistema de irrigação reduz o potencial de aquecimento global em relação à irrigação por inundação contínua.

No período de entressafra, a área sob irrigação por aspersão apresenta potencial de aquecimento global superior àquela irrigada por inundação contínua, devido à maior emissão de óxido nitroso associada à decomposição de resíduos da cobertura de solo estabelecida no período de outono/inverno.

O potencial de aquecimento global da área natural é bastante superior ao das áreas de terras baixas cultivadas com arroz irrigado por aspersão ou inundação.

5 ESTUDO III: Emissão de Metano e Óxido Nitroso Associado a Épocas e Operações de Preparo do Solo e da Cobertura Vegetal em Áreas de Terras Baixas no Sul do Brasil

5.1 RESUMO

Realizou-se o um estudo com o objetivo de avaliar a influência da época e das operações de preparo do solo e da cobertura vegetal sobre as emissões anuais de metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O) do solo, bem como a contribuição desses gases para o potencial de aquecimento global em sistema de produção de grãos em terras baixas. O experimento foi realizado em Planossolo Háplico, na Estação Experimental Terras Baixas (ETB) da Embrapa Clima Temperado, em Capão do Leão, RS, por um período de dois anos (entressafra 2013, safra 2013/14, entressafra 2014 e safra 2014/15). Este foi instalado em área previamente cultivada com arroz irrigado. Os tratamentos compreenderam quatro sistemas produtivos desenvolvidos em terras baixas, envolvendo épocas e operações de preparo do solo, bem como cultivos de verão: T1- arroz/soja/arroz; T2- arroz/arroz/arroz; T3- arroz/arroz/soja; T4- arroz/soja/arroz - preparo. O cultivo de soja em rotação ao arroz irrigado reduziu drasticamente as emissões de CH_4 , em relação ao monocultivo de arroz irrigado, embora potencializasse as emissões de N_2O . Ainda assim, a soja representou uma alternativa promissora para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE) em terras baixas. O N_2O é o principal componente do potencial de aquecimento global da soja, enquanto que o CH_4 predomina no cultivo de arroz irrigado. A cultura antecedente e as operações de preparo do solo influenciaram o efluxo e as emissões acumuladas de CH_4 e de N_2O de Planossolo durante o período de outono/inverno. Em área previamente cultivada com arroz, o CH_4 é o principal componente do potencial de aquecimento global parcial durante a entressafra. A soja praticamente eliminou as emissões de CH_4 na entressafra. As emissões de N_2O na entressafra foram desprezíveis. Os tratamentos cultivados com soja na safra de verão apresentaram um Potencial de Aquecimento Global parcial bem inferior aos tratamentos cultivados com arroz. Por fim, o preparo antecipado do solo em terras baixas com utilização do rolo-faca estimulou as emissões de CH_4 no período da entressafra.

5.2 INTRODUÇÃO

No Rio Grande do Sul, na safra 2015/16, aproximadamente 54% do arroz foram produzidos em sistema de cultivo mínimo, 25% em sistema convencional, sendo 24,5% com semeadura em linha e 0,5% com semeadura à lanço, 10% foram produzidos no sistema plantio direto e 11% foram produzidos em sistema pré-germinado, sendo a produtividade média do arroz na safra 2015/16 no RS foi de 6928 kg ha⁻¹ (IRGA, 2016).

A maioria das áreas de terras baixas cultivadas com arroz têm sido manejadas no outono, logo após a colheita, diferindo do sistema convencional, onde o preparo das áreas é realizado, apenas, nos meses de agosto/setembro, com pouca antecedência da semeadura da cultura (SOSBAI, 2014). O preparo antecipado do solo, no outono permite que a semeadura do próximo cultivo de verão ocorra na época recomendada, possibilitando, ainda, melhor distribuição das atividades mecanizadas e dos custos ao longo do ano.

A antecipação do preparo usando métodos convencionais (arado e grade) pode, porém, ser dificultada pela frequente condição de excesso de umidade do solo após a colheita do arroz, associada ao clima chuvoso vigente no período de outono-inverno, bem como, pela grande quantidade de palha presente. Para contornar esses problemas, Silva et al. (2015) testaram um protótipo de um rolo pesado com facas de aço presas ("rolo-faca"), nos campos de arroz colhidos no Rio Grande do Sul. A viabilidade do equipamento fazer o preparo do solo com alta saturação, foi muito satisfatório, segundo os mesmos autores. Além disso, Silva et al. (2015) concluíram que com o uso do rolo-faca ocorreu menor infestação de plantas daninhas no verão e um menor consumo de combustível em comparação com os métodos de preparo tradicionais.

Silva et al. (2015) também concluíram que a adoção de sistemas de produção lavoura/pecuária, em particular, com a utilização do rolo-faca, a fim de incorporar a palha de arroz para o nivelamento do solo, parece ser uma maneira mais eficiente para estabelecer a pastagem de inverno e melhorou o desempenho geral do sistema, comparado com as áreas em que os animais eram colocados nas áreas com a resteva de arroz (pousio).

No entanto, a época e a forma de manejo dos resíduos culturais (rolo-faca, grade ou pousio) podem ter implicações diferentes sobre as emissões de metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) do solo nos períodos de entressafra e também de cultivo de verão. Nesse sentido, é imprescindível a seleção de sistemas de manejo da palha após a

colheita do arroz que promovam a mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE), particularmente o CH_4 , de lavouras de arroz irrigado (SOUZA et al., 2013).

A adição ou a manutenção de resíduos culturais no solo podem exercer efeitos distintos sobre as emissões de CH_4 e N_2O do solo, sendo a quantidade e a qualidade do material orgânico presente determinantes da taxa de emissão desses gases. O aporte de resíduos fornece carbono ao sistema e favorece o processo de redução do solo, aumentando a produção de CH_4 (BAYER et al., 2014). Por outro lado, a aplicação de resíduos orgânicos no solo pode ser uma prática capaz de inibir as emissões de N_2O em solos cultivados com arroz. Resíduos com alta relação C:N podem estimular a imobilização microbiana no N, reduzindo a sua disponibilidade para os processos envolvidos na produção de N_2O (ROSA et al., 2011; COPETTI, 2015).

Nos últimos anos, tem-se verificado tendência crescente de inclusão da soja em rotação ao arroz irrigado nas áreas de terras baixas do Rio Grande do Sul, tradicionalmente utilizadas com o binômio arroz/pecuária. Inicialmente o objetivo era de reduzir a infestação das áreas por arroz-vermelho e, com o passar do tempo, as adequações no manejo possibilitaram maiores produtividades e impulsionaram o cultivo da soja em terras baixas. Na safra 2014/15, foram cultivadas aproximadamente 280 mil hectares de soja em terras baixas, com uma produtividade média de 2149 kg ha^{-1} (IRGA, 2016). Isso se deve ao resultado de pesquisas que vêm sendo desenvolvidas nos últimos anos por órgãos de pesquisa Públicos e Privados e, devido principalmente ao alto retorno financeiro que a cultura da soja está proporcionando. As pesquisas conduzidas por estes órgãos têm focado a adaptação da soja ao ambientes de terras baixas, bem como o estabelecimento de bases técnicas para o manejo adequado da cultura, permitindo potencializar e estabilizar o rendimento da soja em terras de arroz (VERNETTI JR. et al., 2009; SCHOENFELD, 2010). Mas a grande dificuldade, por parte dos produtores, ainda continua sendo o domínio da técnica de drenagem dos solos para a produção de soja após o arroz (LAVOURA ARROZEIRA, 2015).

A diversificação da produção em terras baixas é uma demanda dos produtores, pois a orizicultura, principal atividade desenvolvida nessas áreas e difundida em grande parte do território gaúcho, enfrenta dificuldades ligadas à sustentabilidade, devido à intensificação do sistema de produção, aumento dos custos de produção, disseminação de sementes de plantas espontâneas e degradação do solo. Contudo, ultimamente surgiu o interesse pela utilização de novas alternativas de cultivo em áreas de terras baixas, capazes de manter, ou mesmo, recuperar a qualidade destes solos. O ato de optar pela

adoção de sistemas conservacionistas e pela rotação de culturas nas lavouras de arroz são algumas das iniciativas que representam um avanço nas pesquisas com vistas à qualidade produtiva e ambiental nesse setor (MENEZES et al., 2012).

A mudança no sistema produtivo nesse ecossistema gera, porém, uma série de impactos não só de caráter econômico e tecnológico, mas também ambiental. Isto desperta o interesse por resultados de pesquisa sobre o efeito da inserção da soja e outros cultivos de sequeiro em solos propensos ao encharcamento e o reflexo sobre as emissões de GEE.

As áreas de terras baixas, quando cultivadas com arroz irrigado, são fonte potencial de emissão de CH_4 , devido às condições de anaerobiose do solo. Contudo, com a introdução da soja, em rotação, em razão de requerer um ambiente drenado para o cultivo, acredita-se que haja mitigação das emissões desse gás de efeito estufa. No entanto, sendo estes ambientes deficientes em drenagem natural do solo e, por vezes a ocorrência de frequentes períodos de estiagem, essa alternância entre o excesso e o déficit de umidade no solo podem determinar comportamentos desconhecidos nas emissões GEE.

Quando se trata das emissões de GEE, nas últimas duas décadas foram realizadas várias medições de campo com foco em emissões de CH_4 e N_2O apenas durante épocas de cultivo do arroz (YU et al, 1997; YAO et al, 2012). No entanto, estudos recentes demonstraram que as emissões de N_2O na entressafra do arroz, ou seja, enquanto culturas de sequeiro são cultivadas, são maiores do que aqueles na safra do arroz (SOUZA, 2013; MA et al, 2013;. ZHOU et al, 2014). No entanto, devido à falta de medições simultâneas de emissões de CH_4 e N_2O ao longo ciclo do período anual (LIU et al, 2010; YAO et al, 2013), pouco se sabe sobre os fluxos anuais de CH_4 e N_2O provenientes de sistemas de cultivo de arroz e soja nas área de terras baixas no sul do Brasil.

Em função do exposto, foi realizado o presente trabalho, que teve por objetivo avaliar a influência da época e das operações de preparo do solo e da cobertura vegetal sobre as emissões anuais de CH_4 e N_2O do solo, bem como a contribuição desses gases para o potencial de aquecimento global em sistema de produção de grãos em terras baixas, visando o estabelecimento de práticas de manejo e sistemas de culturas com potencial mitigador de emissões de GEE para o ambiente de terras baixas.

5.3 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em Planossolo Háplico (STRECK et al., 2008), na Estação Experimental Terras Baixas (ETB) da Embrapa Clima Temperado, em Capão do Leão, RS, por um período de dois anos (entressafra 2013, safra 2013/14, entressafra 2014 e safra 2014/15). Os dados referentes à precipitação pluviométrica incidente na área experimental durante o período de avaliação encontram-se na Figura 17, tendo sido obtidos junto à Estação Agroclimatológica de Pelotas, localizada na Estação Experimental Terras Baixas da Embrapa Clima Temperado.

Os tratamentos compreenderam quatro sistemas produtivos desenvolvidos em terras baixas, envolvendo épocas e operações de preparo do solo, bem como cultivos de verão, tendo sido selecionados de um experimento mais amplo, delineado em faixas. Todos os tratamentos foram instalados em área previamente cultivada com arroz irrigado cultivar BRS Sinuelo CL (safra 2012/13), o qual foi colhido em 10 de abril de 2013. A quantidade média de matéria seca residual presente na superfície do solo imediatamente após a colheita do arroz era de 10835 kg ha⁻¹, a qual apresentava a seguinte composição química (Tabela 3):

Tabela 3. Composição química da resteva de arroz irrigado presente na área experimental por ocasião do início das avaliações.

| N | P | K | Ca | Mg | Fe | Mn | Zn | Cu |
|--------------------|-----|-----|-----|-----|-------|-------|-------|-------|
| g kg ⁻¹ | | | | | | | | |
| 4,9 | 1,2 | 9,5 | 2,9 | 1,5 | 0,490 | 0,281 | 0,013 | 0,001 |

As unidades experimentais apresentavam dimensões de 10 m x 100 m (1000 m²). A descrição de todos os sistemas produtivos avaliados ao longo dos dois anos de avaliação é apresentada na sequência:

T1- arroz irrigado (safra 2012/2013) colhido em solo seco, com manutenção da resteva em superfície durante o período de outono/inverno (2013); dessecação da área na primavera (05/11/2012), seguida de imediata semeadura direta de soja (06/11/2013). Devido ao desenvolvimento insatisfatório, a soja foi ressemeada em 28/12/2013 (cultivar BMX Potência), com colheita realizada em 2/04/2014. Após, realizou-se o preparo antecipado do solo no outono, com o uso de subsolador e grade (29/05/2014). A cobertura vegetal estabelecida durante o outono/inverno foi dessecada na primavera e,

na sequência, procedeu-se à semeadura direta de arroz (cultivar BRS Sinuelo CL) (29/10/2014), que foi colhido em 10/04/2015 (sistema arroz/soja/arroz);

T2- arroz irrigado (safra 2012/2013) colhido em solo úmido, com manutenção da área em pousio durante o período de outono/inverno (2013); preparo convencional do solo na primavera (19/10/2013) e semeadura do arroz cultivar BRS Sinuelo CL (06/11/2013); o cultivo estendeu-se até o dia 12/04/2014, quando o arroz foi colhido em presença de lâmina de água. Ainda durante o outono (29/05/2014), procedeu-se o preparo do solo com rolo-faca. A cobertura vegetal estabelecida durante o inverno foi dessecada na primavera (2014) e, na sequência, procedeu-se à semeadura direta de arroz (cultivar BRS Sinuelo CL) (29/10/2014), que foi colhido em 10/04/2015 (sistema arroz/arroz/arroz);

T3- arroz irrigado (safra 2012/2013) colhido em presença de lâmina de água e preparo do solo imediatamente após com rolo-faca (10/04/2013); a cobertura vegetal estabelecida durante o outono/inverno e início da primavera foi dessecada em 05/11/2013, seguida de semeadura direta de arroz cultivar BRS Sinuelo CL (06/11/2013), cujo cultivo estendeu-se até 12/04/2014, quando foi realizada a colheita em presença de lâmina de água. Ainda durante o outono (29/05/2014), procedeu-se o preparo do solo com rolo-faca. A cobertura vegetal estabelecida durante o inverno foi dessecada na primavera (2014) e, na sequência, procedeu-se à semeadura direta de soja cultivar BMX Potência (24/11/2014), que foi colhida em 10/04/2015 (sistema arroz/arroz/soja).

T4- arroz irrigado (safra 2012/2013) colhido em solo seco, com subsequente preparo antecipado do solo no outono (aração em 19/04-2013 e gradagem em 10/05/2013). A cobertura vegetal estabelecida durante o outono/inverno e início da primavera foi dessecada em 05/11/2013 e, na sequência procedeu-se à semeadura direta de soja (06/11/2013) que, por problemas de emergência, foi ressemeada em 28/12/2013 (cultivar BMX Potência); o cultivo da soja estendeu-se até 12/04/2014, quando foi colhida. Durante o outono, procedeu-se preparo antecipado do solo com subsolador e grade (29/05/2014); a cobertura vegetal estabelecida foi dessecada na primavera e, na sequência, procedeu-se a semeadura direta de arroz cultivar BRS Sinuelo CL (29/10/2014), cujo cultivo estendeu-se até 10/04/2015, quando foi colhido (sistema arroz/soja/arroz c/ Preparo);

Na primeira quinzena de outubro de 2013, foi realizada uma coleta de material vegetal na área do experimento, sendo que a quantidade média de matéria seca residual da entressafra de 2013 em cada tratamento (antes da instalação da safra 2013/14) era de:

T1- Colheita no Seco e Pousio: 5848 kg.ha⁻¹

T2- Colheita no Barro e Pousio: 4667 kg.ha⁻¹

T3- Colheita na Água e Rolo-faca: 2931 kg.ha⁻¹

T4- Colheita no Seco e Preparo antecipado: 3219 kg.ha⁻¹

Na safra 2013/14, em todos os tratamentos, foram aplicados 4,2 ton ha⁻¹ de calcário dolomídico PRNT 76%. A emergência do arroz (tratamentos T2 e T3) ocorreu na segunda quinzena de novembro, tendo sido aplicados 360 kg ha⁻¹ da formulação 5-25-25 como adubação básica na semeadura. A primeira adubação nitrogenada em cobertura (60 kg ha⁻¹ de N – ureia) foi realizada em 09 de dezembro de 2013, correspondendo ao estágio de quatro a cinco folhas. Nessa data, iniciou-se, também, a irrigação do arroz, por inundação do solo. A segunda cobertura nitrogenada foi realizada por ocasião da iniciação da panícula, em 07 de janeiro de 2014 (42 kg ha⁻¹ de N – ureia). Na mesma safra (2013/14), a emergência da soja (tratamentos T1 e T4) ocorreu em 04 de janeiro de 2014. Utilizaram-se sementes inoculadas com inoculante específico. A adubação básica para a soja consistiu na aplicação de 360 kg ha⁻¹ da formulação 5-25-25, localizada na linha de semeadura. E a colheita foi realizada no dia 12 de abril de 2014. A avaliação do rendimento da soja foi desconsiderada em razão de adversidades climáticas (excesso de chuva), que comprometeram o desempenho produtivo e qualidade dos grãos. Desta forma, considerou-se como rendimento da cultura, a produtividade média da soja cultivada em terras baixas na região de cultivo.

Na safra 2014/15, aplicaram-se, como adubação básica do arroz (tratamentos T1, T2 e T4), 280 kg ha⁻¹ da formulação 5-20-20. A primeira adubação nitrogenada em cobertura foi realizada em 01 de dezembro de 2014, correspondendo ao estágio de quatro a cinco folhas (60 kg ha⁻¹ de N – ureia). Nessa data, iniciou-se, também, a irrigação do arroz, por inundação do solo. A segunda cobertura nitrogenada foi realizada por ocasião da iniciação da panícula, em 12 de janeiro de 2015 (46 kg ha⁻¹ de N – ureia).

Quanto à soja, na safra 2014/15 (tratamento T3), também foram utilizadas sementes inoculadas. Como adubação básica, aplicaram-se 250 kg ha⁻¹ da formulação 0-25-25, de forma localizada no sulco de semeadura.

As coletas de ar para avaliação de emissões de GEE foram realizadas de abril de 2013 a abril de 2015 (ano I: 15/04/2013 até 14/04/2014 e ano II: 14/04/2014 até

13/04/2015), tendo iniciado imediatamente após a colheita do arroz da safra 2012/13, estendendo-se até uma semana após colheita do arroz e da soja na safra 2014/15. As amostragens foram realizadas em intervalos regulares de aproximadamente sete dias, durante todo o período de avaliação. Os procedimentos envolvendo a amostragem de ar, a determinação analítica do CH_4 e do N_2O , bem como os cálculos dos fluxos desses gases e do PAGp, utilizados neste estudo, foram idênticos àqueles descritos no Estudo I (ver item 3.3.3), diferenciando, apenas, quanto à amostragem nas parcelas cultivadas com soja, onde foram utilizados coletores distintos, constituídos por câmaras retangulares (40 cm x 80 cm) nas quais não se fez o uso de extensores para realizar a coleta dos GEE, pois as plantas de soja foram removidas no decorrer do ciclo (Figura 16c 16d).

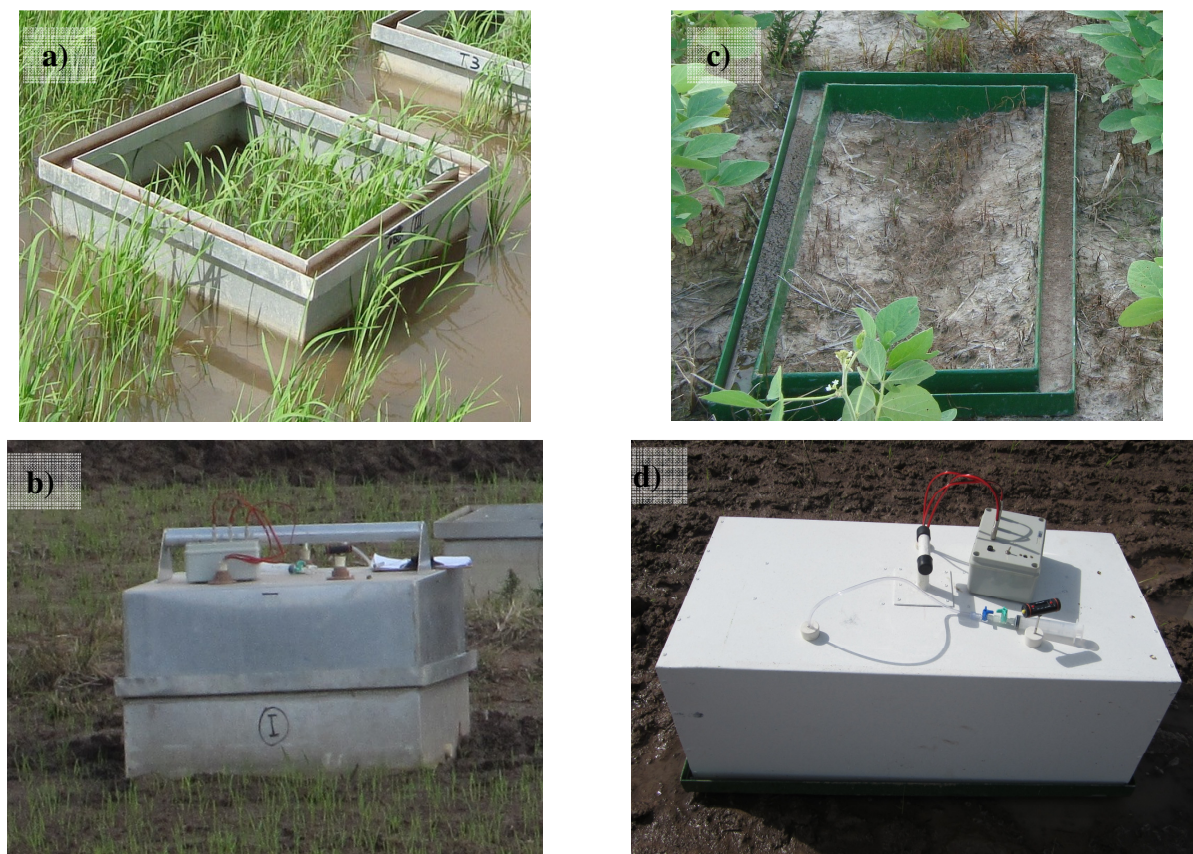


Figura 16. Ilustração das câmaras no experimento no momento da amostragem de ar para a análise dos GEE, sendo “a” e “b” câmaras no arroz e, “c” e “d” câmaras na soja. Capão do Leão, RS. 2014.

Neste capítulo, como os sistemas avaliados envolveram diferentes culturas e de acordo com Snyder et al., (2009), considerou-se apropriado ao invés de calcular o índice PAGp em escala de rendimento (PAGp/Rend), efetuar esse cálculo em função da energia bruta produzida em cada sistema (PAGp/EB), conforme descrito a seguir:

$$\text{PAGpEB} = \frac{\text{PAGp}}{\text{EB}} \quad \text{Equação 1}$$

Onde: onde PAGpEB é potencial de aquecimento global parcial por energia bruta produzida ($\text{kg CO}_2 \text{ equiv. kg}^{-1} \text{ Gcal ha}^{-1}$), PAGp é o potencial de aquecimento global parcial do sistema ($\text{kg CO}_2 \text{ equiv. ha}^{-1}$), e EB é a produtividade de grãos convertida a energia bruta (Gcal ha^{-1}).

Os fluxos diários foram analisados de forma descritiva (média \pm desvio padrão). Os dados da emissão total dos GEE, do Potencial de Aquecimento Global parcial foram submetidos à análise de variância, comparando-se as médias dos tratamentos pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

5.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.4.1 Fluxo de Metano e Óxido Nitroso do Solo

No período de entressafra de 2013, a área sob pousio destinada ao preparo convencional na primavera (T2) e a área preparada com rolo-faca no outono (T3) apresentaram pico máximo de emissão de CH_4 nove dias após o início das avaliações (24-04-2013), correspondentes a 192 e 398 $\text{g CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$, respectivamente (Figura 18). Na área com colheita no seco e sob preparo antecipado (T4) e na área com colheita no seco e pousio (T1), a emissão máxima de CH_4 ocorreu duas semanas após a dos demais sistemas e em magnitude bem menor (14 $\text{g CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$). Para todos os sistemas, emissões significativas de CH_4 ocorreram, apenas, nos primeiros 56 dias de avaliação (até o dia 10-06-2013); após, as emissões foram praticamente nulas, havendo, inclusive, registro de influxo desse GEE. Exceção a esse padrão foi determinada na última época de avaliação na entressafra (28-10-2013), onde foram registrados picos menores de emissão de CH_4 (10 $\text{g CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$), no T3 (Figura 18), associados a eventos concentrados de precipitação intensa (Figura 17).

Atribui-se grande parte da variabilidade nas emissões de CH_4 observadas entre os sistemas de preparo no período de outono/inverno às condições distintas de umidade do solo por ocasião da colheita do arroz, sendo: solo saturado/barro, na área mantida em pousio (T2) e, com presença de lâmina de água, na área preparada com rolo-faca (T3), as quais, pelo maior conteúdo de água, principalmente no período inicial de avaliação, favoreceram a emissão de CH_4 , relativamente ao solo seco, estabelecido nos manejos com preparo antecipado (T4) e pousio (T1). Esta condição de solo seco foi

proporcionada pela supressão antecipada da irrigação do arroz e pelo estabelecimento de sistema de drenagem na área. Também a distribuição e magnitude dos eventos de chuva, que determinaram a ocorrência e duração de períodos de anaerobiose no solo, devem ter contribuído para as emissões de CH_4 , visto que a produção desse GEE está associada à decomposição microbiana de materiais orgânicos, via fermentação, em ambientes anaeróbicos (CONRAD, 2002).

Durante a safra de verão 2013/14, o fator determinante da magnitude das emissões de CH_4 foi a espécie cultivada (arroz ou soja), as duas áreas cultivadas com arroz apresentaram diversos picos de emissão de elevada magnitude ao longo do período de cultivo, decorrentes da condição de anaerobiose, estabelecida pela irrigação por inundação do solo. Os dois maiores picos de emissão de CH_4 ocorreram no 262º (02-01-2014) e 269º (09-01-2014) dia após o início das avaliações, com valores de 357 e 322 g $\text{CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$, na área sob pousio e preparo convencional (T2), e de 424 e 289 g $\text{CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$, na área preparada com rolo-faca (T3), correspondendo ao início da fase reprodutiva do arroz. Nas duas áreas cultivadas com soja, as emissões de CH_4 foram muito próximas de zero ao longo de todo o período de avaliação (Figura 18), em razão da manutenção do solo drenado para sua produção, inibindo a atividade dos micro-organismos metanogênicos.

Também na entressafra (outono/inverno) de 2014 grande parte da variabilidade nas emissões de CH_4 observadas entre os sistemas de preparo devem estar relacionadas às condições distintas de umidade do solo por ocasião da colheita do arroz e da soja. Nas duas áreas em que se cultivou soja na safra 2013/14 (T1 e T4), praticamente não houve efluxo de CH_4 ; os maiores fluxos de CH_4 foram observados no 448º dia após o início das avaliações (07/07/2014), apresentando magnitudes pequenas, correspondentes a 4,84 g $\text{CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (T1) e 2,74 g $\text{CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (T4). Esses fluxos ocorreram logo após um período de sucessivas precipitações (Figura 17). Já nas duas áreas em que foi cultivado arroz na safra 2013/14, observaram-se diversos picos de emissão de CH_4 de maior magnitude, principalmente nos dois primeiros meses após o preparo das áreas com o rolo-faca, que ocorreu em 29 de maio de 2014. Para T2, o pico foi de 547 g $\text{CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (03/07/2014) e para T3, de 219 g $\text{CH}_4 \text{ ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (14/07/2014) (Figura 18). A adição e incorporação da palha do arroz ao solo provavelmente estimulou a atividade microbiana, em resposta à entrada de C e N (BAYER, 2012), originando maiores fluxos de CH_4 do solo.

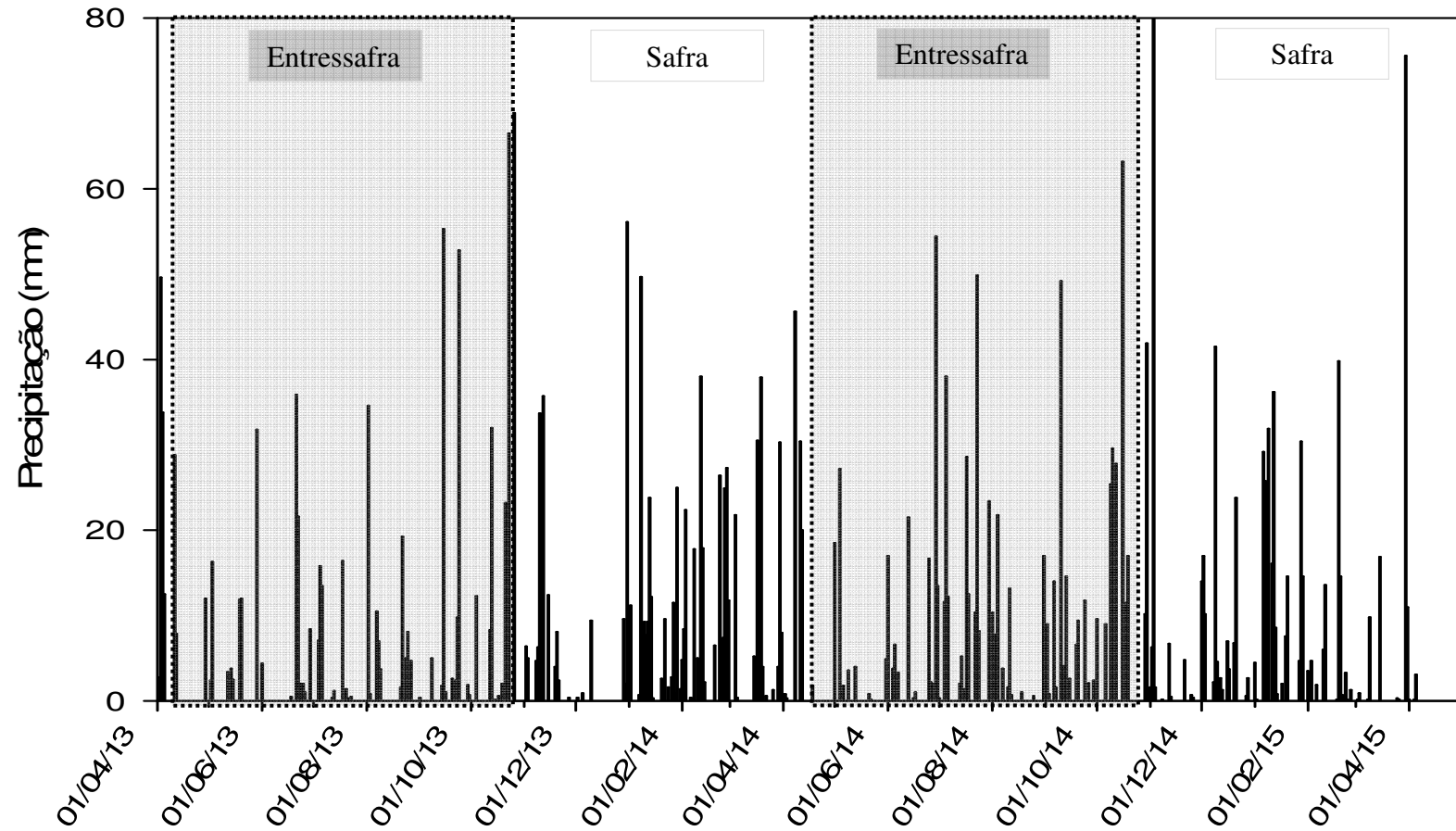


Figura 17. Precipitações na entressafra 2013, na safra 2013/14, na entressafra 2014 e na safra 2014/15 em Planossolo Háplico cultivado com arroz irrigado e soja, sob diferentes sistemas de preparo de solo.

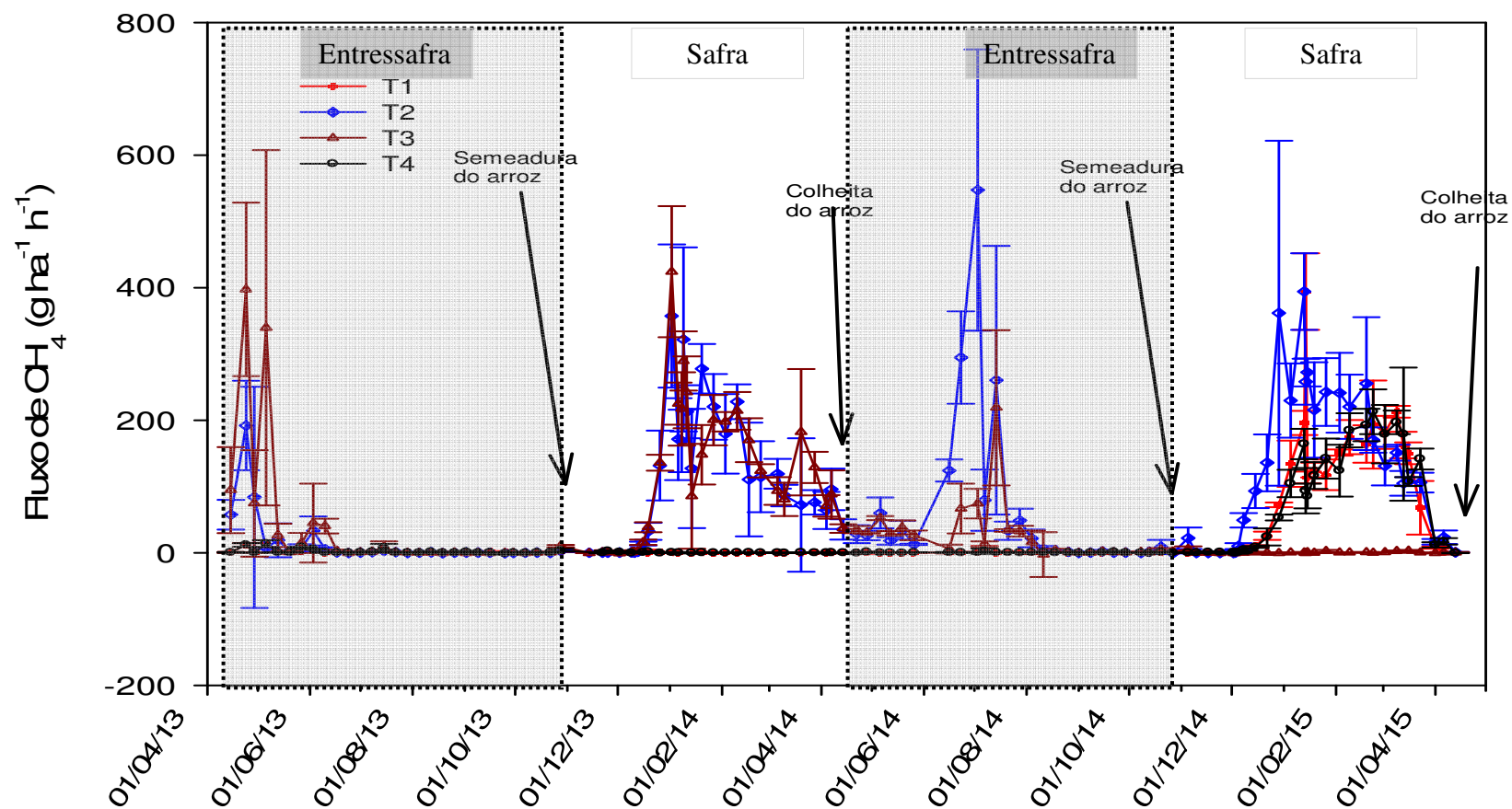


Figura 18. Fluxos de CH_4 na entressafra 2013, na safra 2013/14, na entressafra 2014 e na safra 2014/15 em Planossolo Háplico cultivado com arroz irrigado e soja, sob diferentes sistemas de preparo de solo: Arroz/soja/arroz (T1); Arroz/arroz/arroz (T2); Arroz/arroz/soja (T3); Arroz/soja/arroz c/ preparo (T4).

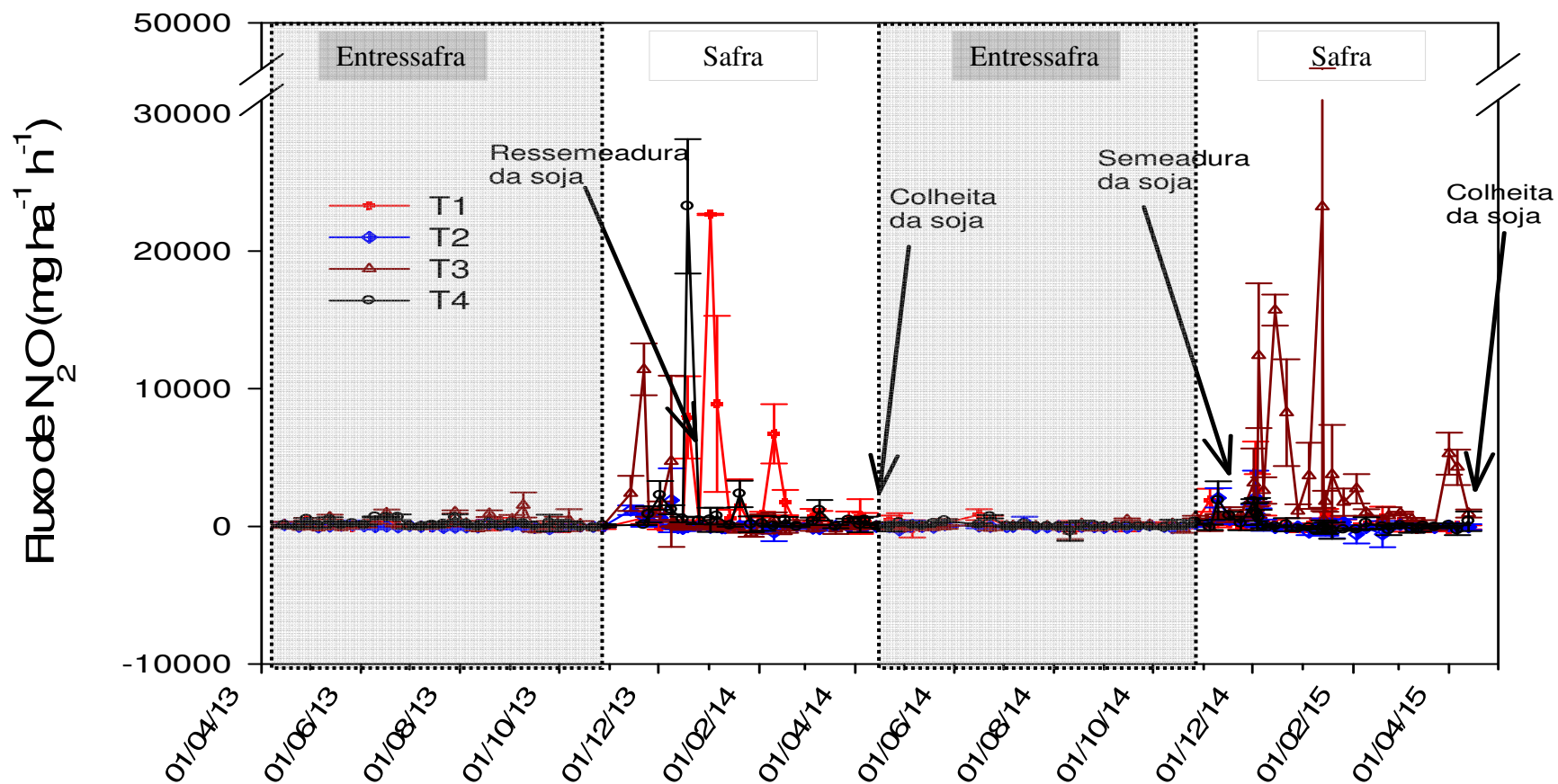


Figura 19. Fluxos de N_2O na entressafra 2013, na safra 2013/14, na entressafra 2014 e na safra 2014/15 em Planossolo Háplico cultivado com arroz irrigado e soja, sob diferentes sistemas de preparo de solo: Arroz/soja/arroz (T1); Arroz/arroz/arroz (T2); Arroz/arroz/soja (T3); Arroz/soja/arroz c/ preparo (T4).

Na safra 2014/15, na área cultivada com soja (T3), as emissões de CH_4 foram muito próximas de zero ao longo de todo o período de avaliação (Figura 18), o que pode ser explicado pela manutenção do solo drenado para a produção dessa oleaginosa, condição essa que inibe a atividade dos micro-organismos metanogênicos. Já nas áreas cultivadas com arroz (T1, T2 e T4), observaram-se diversos picos de emissão de CH_4 , compatíveis com as condições de solo saturado, estabelecidas para o cultivo de arroz irrigado em terras baixas. Os dois maiores picos ocorreram em T2 (tratamento com o cultivo de arroz por três safras sucessivas – 2012/13, 2013/14 e 2014/15), com magnitude de 362 e 394 $\text{g ha}^{-1} \text{h}^{-1}$ de CH_4 . Tais picos foram determinados no 623º (29/12/2014) e 638º (13/01/2015) dia após o início das avaliações, coincidindo com o início da fase reprodutiva do arroz. De acordo com Baggs et al. (2003), a produção de CH_4 no solo exige condições estritamente anaeróbicas, pois restringe-se a micro-organismos anaeróbios obrigatórios, que são sensíveis ao oxigênio, favorecendo o processo de metanogênese.

Na entressafra de 2013, as emissões de N_2O do solo oscilaram bastante. Mas, em geral, apresentaram magnitude reduzida, especialmente na área mantida em pousio destinada ao preparo convencional na primavera (T2), onde a emissão máxima foi de 217 $\text{mg N}_2\text{O ha}^{-1} \text{h}^{-1}$, e na área com colheita no seco com manutenção da palha (T1), onde a emissão máxima foi de 508 $\text{mg N}_2\text{O ha}^{-1} \text{h}^{-1}$. Em ambas as áreas, essa ocorreu no 14º dia (29-04-2013) após o início das avaliações (Figura 19). Na área preparada com rolo-faca (T3), foram determinados alguns picos de emissão de N_2O , dois deles superiores a 1000 $\text{mg N}_2\text{O ha}^{-1} \text{h}^{-1}$, aos 105 (29-07-2013) e 147 (09-09-2013) dias após o início das avaliações. Esses picos foram intercalados com outros menores e, inclusive, com fluxos negativos. Já na área sob preparo antecipado (T4), as maiores emissões de N_2O ocorreram no mês de junho, entre o 56º e 70º dia após o início das avaliações, chegando a 689 $\text{mg N}_2\text{O ha}^{-1} \text{h}^{-1}$ (Figura 19).

Durante o período de safra de 2013/14 (primavera/verão), as emissões de N_2O do solo oscilaram bastante, ou seja, ocorreram fluxos elevados e fluxos de baixa magnitude, determinando-se alternância entre valores baixos de emissão e influxos de N_2O . De maneira geral, em todos os tratamentos, as maiores emissões de N_2O ocorreram no período inicial de desenvolvimento das culturas de verão, especialmente entre o 213º até o 238º dia após o início das avaliações. Nesse período ocorreram os dois maiores picos de emissão de N_2O em ambas as áreas cultivadas com arroz irrigado; esses corresponderam, respectivamente, a 1903 $\text{mg N}_2\text{O ha}^{-1} \text{h}^{-1}$ (238º dia – 09/12/2013)

e 1164 mg N₂O ha⁻¹ h⁻¹ (213° dia – 14/11/2013), na área sob preparo convencional de primavera (T2), e a 11403 mg N₂O ha⁻¹ h⁻¹ (221° dia – 22/11/2013) e 4728 mg N₂O ha⁻¹ h⁻¹ (238° dia), na área preparada com rolo-faca no outono (T3) (Figura 19). Os picos de emissão do 213° e 221° dia após o início das avaliações ocorreram imediatamente após períodos com precipitação, ou seja, provavelmente ocorreram ciclos de oxirredução no solo. Já o pico do 238° dia após o início das avaliações, ocorreu no dia em que foi realizada a primeira cobertura com nitrogênio e o início da irrigação por inundação do solo. Em lavouras de arroz irrigado, as emissões de N₂O estão associadas principalmente à alternância nas condições de oxirredução do solo, que predispõe a ocorrência dos processos de nitrificação/desnitrificação (REDDY & DELAUNE, 2008), que têm o N₂O como produto intermediário.

Nas duas áreas cultivadas com soja na safra 2013/14, de acordo com a Figura 19, os fluxos máximos de N₂O foram observados aos 248 dias após o início das avaliações (19-12-2013) no tratamento com preparo antecipado do solo no outono/inverno (T4) (23260 mg ha⁻¹h⁻¹) e, aos 262 dias após o início das avaliações (02-01-2014), no tratamento pousio no outono/inverno (T1) (22681 mg ha⁻¹h⁻¹). Esses picos são bem superiores aos encontrados no atual estudo nas áreas com arroz irrigado, os quais atingiram o pico de 11403 mg N₂O ha⁻¹ h⁻¹ (conforme já discutido anteriormente) e, são também superiores aos encontrados por Veçozzi (2015) em estudo realizado em área adjacente a do presente estudo, na mesma safra agrícola, com a cultura do arroz, que apresentou magnitude de 13076 mg ha⁻¹ h⁻¹. Em relação ao tratamento em que a soja foi semeada em sistema plantio direto (T1) observam-se, ainda, três outros picos de emissão de N₂O, com valores de 7918 mg ha⁻¹h⁻¹ (248° dia – 19/12/2013), 8906 mg ha⁻¹h⁻¹ (266° dia – 06/01/2014) e 6725 mg ha⁻¹h⁻¹ (301° dia – 10/02/2014) (Figura 19). A manutenção da palha do arroz na superfície do solo durante o período de entressafra possivelmente tenha contribuído para a ocorrência desses outros três picos, que coincidiram com períodos de chuvas mais intensas na safra (Figura 17), pois a presença da palha em superfície mantém a umidade do solo e favorece a desnitrificação, podendo estar relacionado, ainda, à menor difusão de oxigênio decorrente da compactação do solo, na ausência de revolvimento (BAGGS et al., 2003).

Sob ambos os manejos do solo, sem preparo (T1) e preparo antecipado (T4), os picos de emissão de N₂O durante o cultivo da soja que ocorreram no 248° dia após o início das avaliações (Figura 19), possivelmente esteja relacionada à ocorrência de um período prévio de estiagem (Figura 17), que exigiu a irrigação da cultura por inundação

intermitente (banho). Essa prática de manejo elevou a umidade do solo e estabeleceu temporariamente microsítios anaeróbicos, condição que, associada à presença de fonte de carbono lábil e de temperaturas elevadas, estimulou a atividade de micro-organismos associados aos processos de nitrificação/desnitrificação, geradores de fluxos de N_2O (BAGGS et al., 2003). Após esse período, as emissões de N_2O medidas na área sob preparo antecipado (T4) foram de baixa magnitude ou nulas.

As emissões de N_2O do solo durante o segundo período de outono/inverno (entressafra de 2014), em geral, apresentaram magnitude bastante reduzida, principalmente nas áreas que haviam sido cultivadas com arroz na safra anterior (T2 e T3); em vários momentos ocorrendo inclusive influxos de N_2O . Já nas duas áreas cultivadas com soja na safra 2013/14 (T1 e T4) determinaram-se pequenos fluxos de N_2O concentrados no período inicial de avaliação na entressafra (Figura 19), coincidindo com o período de decomposição da palha da soja.

Em relação aos fluxos de N_2O no período da safra 2014/15, no tratamento em que a soja foi cultivada em área previamente cultivada com arroz irrigado e preparada com rolo-faca no outono (T3), determinaram-se três picos de emissão de N_2O de elevada magnitude, aos 599 (05/12/2014), de 12406 $mg\ ha^{-1}\ h^{-1}$, aos 609 (15/12/2014), de 15717 $mg\ ha^{-1}\ h^{-1}$, e aos 638 (13/01/2015), de 23232 $mg\ ha^{-1}\ h^{-1}$ dias após o início das avaliações (Figura 19), os quais ocorreram em épocas próximas a períodos de chuva (Figura 17), que causaram a saturação do solo, condição que, alternada à secagem do solo, favorece os processos de nitrificação/desnitrificação, que têm o N_2O como produto intermediário (TOWPRAYOON et al., 2005). Já nas áreas cultivadas com arroz irrigado (T1, T2 e T4), observaram-se dois picos de emissão de N_2O , o primeiro no início de novembro, na semana seguinte à semeadura do arroz, e o segundo, no período compreendido pelo 596º e 597º dias após o início das avaliações (2 e 3 de dezembro de 2014) (Figura 19), coincidindo com a época de realização da primeira cobertura com nitrogênio (01/12/2014). Segundo Liu et al. (2010), as emissões de N_2O em cultivo de arroz irrigado estão associadas à aplicação de fertilizantes nitrogenados e à alternância nas condições de oxirredução do solo, resultantes da instabilidade de manutenção da lâmina de água na lavoura. No restante do período de avaliação, as emissões de N_2O foram de baixa magnitude, chegando à apresentar valores negativos em várias coletas.

5.4.2 Emissão Total de CH₄, de N₂O e o Potencial de Aquecimento Global parcial (PAGp)

Na entressafra de 2013, a emissão total de CH₄ foi maior na área preparada com rolo-faca (T3) (169 kg CH₄ ha⁻¹), diferindo estatisticamente das demais: área em pousio/preparo convencional (T2) (64 kg CH₄ ha⁻¹), área sob preparo antecipado (T4) (9,1 kg CH₄ ha⁻¹) e área com colheita no seco e pousio (T1) (8,6 kg CH₄ ha⁻¹) (Tabela 4), que não diferiram entre si.

Apesar das diferenças entre os manejos do solo, as emissões de CH₄ medidas no outono/inverno foram relativamente baixas, considerando-se aquelas observadas durante o período de cultivo do arroz (safra 2013/14), variando entre 408 kg CH₄ ha⁻¹, na área sob preparo convencional (T2), a 438 kg CH₄ ha⁻¹, na área preparada com rolo-faca (T3). Por outro lado, nas áreas cultivadas com soja, pela manutenção do solo oxidado, praticamente não se determinaram emissões de CH₄ (2,3 kg CH₄ ha⁻¹ em T4 e 1,75 kg CH₄ ha⁻¹ em T1), sendo significativamente inferiores às emissões das áreas cultivadas com arroz irrigado (Tabela 4). Em estudo realizado na China, Zhou et al. (2015) avaliaram, por três anos, as emissões de CH₄ e N₂O de área cultivada com arroz irrigado, na safra, e colza, na entressafra, tendo observado que a maior parte do CH₄ foi emitido durante o período de cultivo do arroz (>97%).

Na entressafra de 2014, a emissão total de CH₄ decresceu na seguinte ordem: área cultivada com arroz na safra antecedente e preparada com rolo-faca na entressafra de 2014 (T2) (305 kg CH₄ ha⁻¹) > área cultivada com arroz na safra antecedente e preparada com rolo-faca (T3) (126 kg CH₄ ha⁻¹) > área cultivada com soja na safra anterior com preparo antecipado do solo na entressafra de 2014 (T1) (2,2 kg CH₄ ha⁻¹), que não diferiu estatisticamente da área cultivada com soja e preparo antecipado (T4) (1,75 kg CH₄ ha⁻¹) (Tabela 4), demonstrando que nas áreas cultivadas com soja (cultivo de sequeiro) no verão, a emissão total de CH₄ é reduzida (próxima a zero) na entressafra seguinte. Esse comportamento também foi verificado na safra 2014/15, na área cultivada com soja (T3), onde, pela manutenção do solo oxidado, praticamente não se determinou emissão de CH₄ (3,3 kg CH₄ ha⁻¹). Nas áreas com cultivo de arroz na safra 2014/15, as emissões de CH₄ foram maiores, particularmente área em que se cultivou arroz irrigado por três safras consecutivas (T2), com emissão total de 526 kg CH₄ ha⁻¹, a qual é estatisticamente superior à das áreas com sistema arroz/soja/arroz – T1 (335 kg CH₄ ha⁻¹) e T4 (333 kg CH₄ ha⁻¹), que foram semelhantes entre si (Tabela 4). A magnitude superior das emissões acumuladas de CH₄ nos sistemas com produção de

arroz irrigado provavelmente se devam às condições de baixo potencial de oxirredução do solo, que favoreceram a redução dos compostos orgânicos do solo e, simultaneamente, a produção desse gás, pela ação de micro-organismos metanogênicos (WELLER et al., 2015).

Tabela 4. Emissão total de CH₄ na entressafra 2013, safra 2013/14, entressafra 2014 e safra 2014/15 em Planossolo Háplico cultivado com arroz irrigado e soja, sob diferentes sistemas de preparo de solo: Arroz/soja/arroz (T1); Arroz/arroz/arroz (T2); Arroz/arroz/soja (T3); Arroz/soja/arroz c/ prep.(T4).

| Tratamentos | Entressafra 2013 | Safra 2013/14 | TOTAL ANO I | Entressafra 2014 | Safra 2014/15 | TOTAL ANO II |
|---|---------------------|------------------|------------------------|---------------------|------------------|-------------------------|
| ----- CH ₄ kg.ha ⁻¹ ----- | | | | | | |
| T1 | 8,6b ¹ | 1,7b | 10,3c | 2,2c | 335,1b | 337,3b |
| T2 | 64,5b | 408,5a | 473,0b | 305,0a | 526,4a | 831,4a |
| T3 | 169,5a | 438,5a | 608,0a | 125,9b | 3,3c | 129,2c |
| T4 | 9,2b | 2,3b | 11,4c | 1,7c | 332,6b | 334,3b |

¹Médias seguidas de letras distintas, nas colunas, diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5%.

Nos dois anos de avaliação, as áreas preparadas antecipadamente com rolo-faca, ou seja, ANO I (T3) e ANO II (T2 e T3), apresentaram maiores emissões de CH₄ no período da entressafra, comparativamente às demais formas de preparo do solo (aração e gradagem) ou mantidas em pousio. Explica-se esse comportamento pela alteração na estrutura do solo preparado com rolo-faca, diminuindo a capacidade das bactérias em oxidar CH₄ (BALL et al., 1999) em função da diminuição das condições físicas (estruturais), químicas e biológicas do solo que são ideais ao estabelecimento das bactérias metanotróficas (SMITH et al., 2000), que pode aumentar os fluxos de CH₄ no solo. Outro efeito importante é o da adição e incorporação da palha de arroz ao solo, estimulando a microbiota, devido ao aporte de C e N (BAYER, 2012), no caso do rolo-faca o aumento nos fluxos de CH₄ provavelmente ocorre devido a associação dos fatores palha e umidade do solo.

Na entressafra de 2013, a emissão total de N₂O foi muito baixa, na área colhida no seco e mantida sob pousio (T1) (0,3 kg ha⁻¹), e nula na área colhida em solo úmido e mantida sob pousio no outono/inverno, aguardando o preparo convencional na

primavera (T2) (Tabela 5); nas áreas preparadas com rolo-faca –T3 (1,1 kg ha⁻¹) e antecipadamente –T4 (0,9 kg ha⁻¹), as emissões de N₂O também foram baixas, embora significativamente superiores às dos dois tratamentos com manutenção do solo em pousio. As baixas emissões de N₂O no outono-inverno devem estar associadas ao baixo conteúdo de N na palha do arroz e na vegetação espontânea estabelecida durante o outono/inverno.

Também durante a safra (2013/14), as áreas cultivadas com arroz irrigado apresentaram baixas emissões totais de N₂O, especialmente quando sob preparo convencional de primavera (T2) (0,7 kg ha⁻¹); na área preparada com rolo-faca (T3), as emissões totalizaram 2,9 kg ha⁻¹, confirmando observações de que o arroz irrigado por inundação contínua apresenta baixo potencial de emissão de N₂O (ZSCHORNACK, 2011). Já nas áreas cultivadas com soja, as emissões de N₂O alcançaram 7,9 kg ha⁻¹ (colheita no seco e mantido sob pousio – T1) e 4,8 kg ha⁻¹ (preparo antecipado – T4), o que indica que o cultivo dessa oleaginosa em rotação ao arroz irrigado potencializou as emissões de N₂O do solo. Resultado distinto foi relatado por Camargo (2015), que encontrou emissão 55% inferior de N₂O nas áreas cultivadas com soja (sem aplicação de N), quando comparadas com às áreas cultivadas arroz irrigado.

Na entressafra de 2014, a emissão total de N₂O foi muito pequena em todas as áreas, determinando-se emissão de 0,6 kg ha⁻¹ em T1 e de 0,4 kg ha⁻¹ em T4, áreas em que havia sido cultivada soja na safra anterior. Nas áreas previamente cultivadas com arroz as emissões totais, no período de entressafra, foram de 0,1 kg ha⁻¹, em T3, e nulas, em T2, sendo essas emissões significativamente inferiores às encontradas em T1 e T4. Já na safra 2014/15, as emissões de N₂O nas áreas cultivadas com arroz também foram pouco expressivas, sendo de: 1 kg ha⁻¹ (T1); 0,5 kg ha⁻¹ (T4) e 0,4 kg ha⁻¹ (T2). Por sua vez, na área em que foi cultivada a soja (T3), determinou-se maior emissão total de N₂O (12,7 kg ha⁻¹), sendo estatisticamente superior a das demais áreas, confirmando resultado observado na safra anterior, nas áreas cultivadas com soja (Tabela 5).

Comparando-se as emissões totais de N₂O dos períodos de entressafra com as das safras, observa-se que, durante as safras, essas foram superiores à dos períodos de entressafra, independentemente do sistema considerado. Esse resultado reforça a necessidade de identificarem-se manejos que minimizem as emissões de N₂O do solo durante o período de cultivo das espécies de verão.

Tabela 5. Emissão total de N₂O na entressafra 2013, safra 2013/14, entressafra 2014 e safra 2014/15 em Planossolo Háplico cultivado com arroz irrigado e soja, sob diferentes sistemas de preparo de solo: Arroz/soja/arroz (T1); Arroz/arroz/arroz (T2); Arroz/arroz/soja (T3); Arroz/soja/arroz c/ prep.(T4).

| Tratamentos | Entressafra 2013 | Safra 2013/14 | TOTAL ANO I | Entressafra 2014 | Safra 2014/15 | TOTAL ANO II |
|---|---------------------|------------------|------------------------|---------------------|------------------|-------------------------|
| -----N ₂ O kg.ha ⁻¹ ----- | | | | | | |
| T1 | 0,3b ¹ | 7,9a | 8,2a | 0,6a | 1,0b | 1,6b |
| T2 | 0,04b | 0,7c | 0,7c | -0,03b | 0,4b | 0,4b |
| T3 | 1,1a | 2,9bc | 4,0bc | 0,1b | 12,7a | 12,8a |
| T4 | 0,9a | 4,7ab | 5,6ab | 0,4a | 0,5b | 0,9b |

¹Médias seguidas de letras distintas, nas colunas, diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5%.

Quanto ao potencial de aquecimento global parcial (PAGp), no ANO I, observa-se que as áreas cultivadas com soja no verão, apresentaram PAGp menor do que as áreas cultivadas com arroz irrigado. Já no ANO II, verifica-se que, as áreas cultivadas com soja na safra anterior e atual apresentaram emissões significativamente menores que a da área cultivada com arroz nas duas safras (Tabela 6).

Nos dois anos de avaliação, o PAGp de todos os tratamentos sempre foi maior na safra, relativamente à entressafra (Tabela 6). Quando o cultivo de verão é o arroz irrigado, o CH₄ é o principal componente do PAGp; mas quando é a soja, o N₂O é o GEE que mais contribui para o PAGp. Esses resultados corroboram com dados de estudo conduzido por Silva (2014), na mesma área do presente estudo, onde, independentemente da época e do manejo do solo e da palha, o período de cultivo do arroz irrigado (safra) contribui com mais de 80% para o PAGp anual em Planossolo, em razão das maiores emissões de CH₄.

Ao se compararem os valores de PAGp do presente estudo com os dados encontrados por Camargo (2015), observa-se que os valores de PAGp no período da safra da soja do presente estudo são superiores. Camargo (2015) encontrou valores de PAGp abaixo de 1000 kg CO₂ equiv.ha⁻¹ e, no presente estudo não se encontrou nenhum PAGp na safra abaixo de 1000 kg CO₂ equiv.ha⁻¹.

Nos dois anos de avaliação, observou-se que as áreas cultivadas com soja apresentaram menor PAGp (somando entressafra e safra), ou seja, no ANO I, os

tratamentos T1 e T4 apresentaram PAGp de 2705 kg CO₂ equiv.ha⁻¹ e 1972 kg CO₂ equiv.ha⁻¹, respectivamente. Os valores determinados para as áreas cultivadas com arroz irrigado (T2 e T3) de 12040 kg CO₂ equiv.ha⁻¹ e 16401 kg CO₂ equiv.ha⁻¹, respectivamente (Tabela 6). No ANO II, a única área com soja (T3) apresentou um PAGp de 7056 kg CO₂ equiv.ha⁻¹, enquanto que as áreas com arroz irrigado apresentaram PAGp de 8649 kg CO₂ equiv.ha⁻¹ (T4), 8924 kg CO₂ equiv.ha⁻¹ (T1) e 20900 kg CO₂ equiv.ha⁻¹ (T2) (Tabela 6).

Tabela 6. Potencial de Aquecimento Global parcial (PAGp) na entressafra 2013, safra 2013/14, entressafra 2014 e safra 2014/15 em Planossolo Háplico cultivado com arroz irrigado e soja, sob diferentes sistemas de preparo de solo: Arroz/soja/arroz (T1); Arroz/arroz/arroz (T2); Arroz/arroz/soja (T3); Arroz/soja/arroz c/ prep.(T4).

| Tratamentos | Entressafra 2013 | Safra 2013/14 | TOTAL ANO I | Entressafra 2014 | Safra 2014/15 | TOTAL ANO II |
|---|---------------------|------------------|------------------------|---------------------|------------------|-------------------------|
| -----PAGp (kg CO ₂ equiv.ha ⁻¹)----- | | | | | | |
| T1 | 315b ¹ | 2390b | 2705c | 236c | 8688ab | 8924b |
| T2 | 1624b | 10416a | 12040b | 7616a | 13284a | 20900a |
| T3 | 4578a | 11823a | 16401a | 3171b | 3885c | 7056b |
| T4 | 499b | 1473b | 1972c | 171c | 8478bc | 8649b |

¹Médias seguidas de letras distintas, nas colunas, diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5%.

Ao se analisar o PAGp total nos dois anos, observa-se que o sistema com monocultivo de arroz (arroz/arroz/arroz – T2) foi o que proporcionou maior valor de PAGp total (32941 kg CO₂ equiv.ha⁻¹), comparativamente ao sistema arroz/arroz/soja (T3) (23458 kg CO₂ equiv.ha⁻¹) e com os sistemas arroz/soja/arroz (T1 e T4) que, por sua vez, apresentaram menor PAGp total que os demais, 11629 kg CO₂ equiv.ha⁻¹ e 10621 kg CO₂ equiv.ha⁻¹, respectivamente (Figura 20).

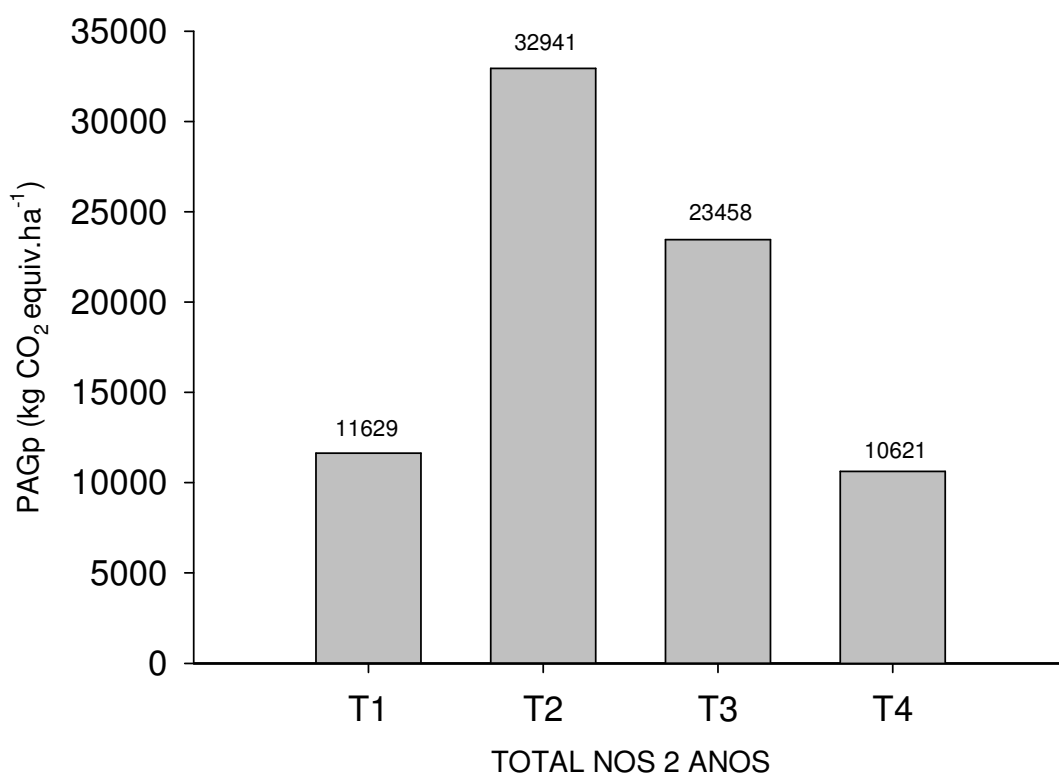


Figura 20. Potencial de Aquecimento Global parcial (PAGp) ao longo de dois anos em Planossolo Háplico cultivado com arroz irrigado e soja sob diferentes sistemas de preparo de solo: Arroz/soja/arroz (T1); Arroz/arroz/arroz (T2); Arroz/arroz/soja (T3); Arroz/soja/arroz c/ prep.(T4).

O índice PAGp/EB, que se refere à relação entre o PAGp e a quantidade de energia produzida, foi maior nas áreas cultivadas com arroz irrigado, correspondendo a: 307 (T2) e 373 (T3) kg de CO₂ eq. Gcal⁻¹ de EB produzida em 2013/14 (Tabela 7), comparativamente às áreas cultivadas com soja 263 (T1) e 162 (T4) kg de CO₂ eq. Gcal⁻¹ de EB produzida. Assim, embora as áreas cultivadas com arroz tenham apresentado elevado potencial de produtividade, como seu PAGp foi superior ao da soja, essas apresentaram maior índice PAGp/EB. No entanto, na safra seguinte (2014/15), os índices PAGp/EB nas áreas de produção da soja foram similares ao observado nas áreas com arroz, isso ocorreu, devido as altas emissões de N₂O no período da safra nas áreas da soja, que por sua vez elevaram o PAGp.

Tabela 7. Produtividade de grãos, energia bruta produzida e intensidade da emissão de GEE (considerando apenas o PAGp das safras) nas safras 2013/14 e 2014/15, sob diferentes sistemas de preparo de solo e cultivos de verão: Arroz/soja/arroz (T1); Arroz/arroz/arroz (T2); Arroz/arroz/soja (T3); Arroz/soja/arroz com preparo do solo (T4).

| Safr | Tratamentos | Rendimento | Energia | Índices GEE ⁽²⁾ | |
|---------|-------------|---------------------------------------|---|----------------------------|---------|
| | | Grãos | Bruta ⁽¹⁾ (EB) | PAGp/Rend. | PAGp/EB |
| | | kg ha ⁻¹ ano ⁻¹ | Gcal ha ⁻¹ ano ⁻¹ | | |
| 2013/14 | T1 (Soja) | 2046 ⁽³⁾ | 9,1 | 1,17 | 263 |
| | T2 (Arroz) | 7818 | 33,9 | 1,33 | 307 |
| | T3 (Arroz) | 7308 | 31,7 | 1,62 | 373 |
| | T4 (Soja) | 2046 ⁽³⁾ | 9,1 | 0,72 | 162 |
| 2014/15 | T1 (Arroz) | 6496 | 28,2 | 1,34 | 308 |
| | T2 (Arroz) | 8941 | 38,8 | 1,49 | 342 |
| | T3 (Soja) | 2591 | 11,5 | 1,50 | 338 |
| | T4 (Arroz) | 7686 | 33,3 | 1,10 | 255 |

⁽¹⁾ Os dados de energia bruta (EB) para os diferentes grãos produzidos foram obtidos das tabelas brasileiras para aves e suínos de Rostagno et al. (2011), sendo: arroz: 4,34 Mcal kg grão⁻¹ e soja: 4,46 Mcal kg grão⁻¹. ⁽²⁾ IGEE: Intensidade das emissões de GEE, medidas como PAGp por unidade de energia bruta produzida pelo sistema. ⁽³⁾ Produtividades da soja na safra 2013/14 correspondem à média do Estado do RS naquela safra, obtidos no SITE do Instituto Rio Grandense do Arroz (<http://www.irga.rs.gov.br/>).

5.5 CONCLUSÕES

O cultivo de soja em terras baixas reduz drasticamente as emissões de metano, em relação ao arroz irrigado, embora potencialize as emissões de óxido nitroso do solo. Ainda assim, a soja representa uma alternativa promissora para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa em terras baixas.

O óxido nitroso é o principal componente do potencial de aquecimento global da soja, enquanto que o metano é o gás de efeito estufa predominante no cultivo de arroz irrigado.

A cultura antecedente e as operações de preparo do solo influenciam o fluxo e as emissões acumuladas de metano e óxido nitroso de Planossolo durante o período de

outono/inverno. Em área previamente cultivada com arroz, o metano é o principal componente do potencial de aquecimento global parcial no período de entressafra. O cultivo de soja praticamente elimina as emissões de metano na entressafra. As emissões de óxido nitroso na entressafra são desprezíveis, relativamente à safra.

A rotação com soja proporciona potencial de aquecimento global parcial bem inferior ao do monocultivo de arroz.

O preparo antecipado do solo em terras baixas com utilização do rolo-faca potencializa as emissões de metano no período da entressafra, relativamente ao preparo antecipado do solo e à sua manutenção em pousio.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O cultivo do arroz sob condições de alagamento tem sido citado como uma atividade agrícola com elevado potencial de emissão de gases de efeito estufa (GEE), como o metano (CH_4). Embora em diversos estudos realizados em outros países, ou até mesmo aqui no Brasil, se verifique esse comportamento, esses trabalhos normalmente trazem informações em relação às emissões de GEE especialmente do período de cultivo de arroz (safra), muitos deles sem considerar o período de entressafra e sem avaliar (comparar) sistemas naturais sem histórico de cultivo.

A execução desta pesquisa forneceu subsídios no que se refere a dados locais das emissões de GEE em cultivos de arroz sob alagamento contínuo em Pelotas - RS. Ademais, demonstrou que sistemas intermitentes de irrigação, sistema de irrigação por aspersão e a introdução de uma cultura de sequeiro (soja) diminuem o potencial de aquecimento global parcial nos cultivos em terras baixas, principalmente devido a redução das emissões de CH_4 . Embora, esses sistemas “alternativos” de manejo e da irrigação apresentem maiores emissões de óxido nitroso (N_2O), o efeito na redução das emissões de CH_4 foi superior, contribuindo para um menor potencial de aquecimento global parcial (PAGp). Além disso, esses sistemas alternativos de irrigação, podem também contribuir para a redução do uso da água.

O uso de sistemas de manejo de água e solo que proporcionem um menor PAGp, mantendo a produtividade, possibilita uma maior sustentabilidade ambiental para o sistema produtivo arrozeiro.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMAD, S.; LI, C.; DAI, G.; ZHAN, M.; WANG, J.; PAN, S.; CAO, C. Greenhouse gas emission from direct seeding paddy field under different rice tillage systems in central China. **Soil and Tillage Research**, v.106, p.54-61, 2009.
- AMADO, T.J.C.; BAYER, C.; CONCEIÇÃO, P.C.; SPAGNOLLO, E.; CAMPOS, B.C. & VEIGA, M. Potential of carbon sequestration in no-till soils with intensive use and cover crops in the southern Brazil. **J. Environ. Quality**, v.35, p.1599-1607, 2006.
- ANGHINONI, I.; GENRO Jr, S.A.; SILVA, L.S.; BOHNEN, H.; RHEINHEIMER, D.S.; OSÓRIO FILHO, B.D.; MACEDO, V.R.M.; MARCOLIN, E. Fertilidade dos solos cultivados com arroz irrigado no Rio Grande do Sul. **Boletim Técnico. IRGA**, Cachoeirinha. 51p. 2004
- AULAKH, M. S.; KHERA, T. S.; DORAN, J. W.; BRONSON, K. F. Denitrification, N₂O and CO₂ fluxes in rice-wheat cropping system as affected by crop residues, fertilizer N and legume green manure. **Biology and Fertility of Soils**. Berlim, v. 34, p. 375-389, 2001.
- AULAKH, M.S.; WASSMANN, R.; RENNENBERG, H.; *et al.* Pattern and amount of aerenchyma relate to variable methane transport capacity of different rice cultivars. **Plant Biology**, Stuttgart, v.2, n.2, p.182-194, 2000.
- BAGGS, E.M., STEVENSON, M., PIHLATIC, A., REGAR, A., COOK, H., CADISCH, G. Nitrogen oxide emissions following application of residues and fertilizer under zero and conventional tillage. **Plant and Soil** 254, 361-270, 2003
- BAIRD, C. **Química Ambiental**. Porto Alegre: Bookman, O Efeito Estufa e o Aquecimento Global. 622p. Cap. 4, 2002.
- BALL, B.C., SCOTT, A., PARKER, J.P. Field N₂O, CO₂ and CH₄ fluxes in relation to tillage, compaction and soil quality in Scotland. **Soil Till** 53, 29-39, 1999.
- BAMBERG, A. L.; PAULETTO, E. A.; GOMES, A. S.; TIMM, L. C.; PINTO, L. F. S.; LIMA, A. C. R.; SILVA, T. R. Densidade de um planossolo sob sistema de cultivo avaliada por meio da tomografia computadorizada de raios gama. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1079-1086, 2009.
- BAYER, C., GOMES, J., VIEIRA, F.C.B., ZANATTA, J.A., PICCOLO, M.C., DIECKOW, J. Methane emission from soil under long-term no-till cropping system. **Soil and Tillage Research** 124, 1-7, 2012.
- BAYER, C. et al. Yield-scaled greenhouse gas emissions from flood irrigated rice under long-term conventional tillage and no-till systems in a Humid Subtropical climate. **Field Crops Research**, Farnham, v.162, p. 60–69, 2014.
- BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A.; DIECKOW, J. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. **Soil and Tillage Research**, v.86, p.237-245, 2006.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G.A.; SILVA, L.S.; CANELLAS, L.P.; CAMARGO, F.A.O. (Eds.) **Fundamentos da**

matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais. 2a Ed. Porto Alegre: Metropole, p.9-26, 2008.

BODELIER, P. L. E.; ROSLEV, P.; HENCKEL, T.; FRENZEL, P. Stimulation by ammonium-based fertilizers of methane oxidation in soil around rice roots. **Nature**, London, v.403, n.6768, p. 421-424, 2000.

BOHNEN, Humberto; SILVA, Leandro Souza da; MACEDO, Vera Regina Mussoi and MARCOLIN, Elio. **Ácidos orgânicos na solução de um gleissolo sob diferentes sistemas de cultivo com arroz irrigado.** Rev. Bras. Ciênc. Solo, vol.29, n.3, p. 475-480, 2005.

BRADFORD, M. A.; INESON, P.; WOOKEY, P. A.; LAPPIN-SCOTT, H. M. Role of CH₄ oxidation, production, and transportation in forest soil CH₄ flux. **Soil Biology and Biochemistry**. 33:1625–1631. 2001.

BRITZKE, D., SILVA, L. S. da, MORO, V. J., BUNDT, A. C., ÁVILA, L. A., BAYER, C., ZSCHORNACK, T.; MARCHEZAN, E. Emissão de metano em arroz cultivado por alagamento com irrigação contínua e intermitente. In: FERTBIO 2008, Londrina. **Anais...** Londrina: SBCS, 2008.

BRONSON, K.F.; NEUE, H.U.; SINGH, U.; ABAO, E.B. Automated chamber measurements of methane and nitrous oxide flux in a flooded rice soil: I. Residue, nitrogen, and water management. **Soil Science Society of America Journal**. v.61, p.981–987. 1997.

BUENDIA, L.V.; NEUE, H.U.; WASSMANN, R.; LANTIN, S.; JAVELLANA, A.M. Understanding the nature of methane emission from rice ecosystem as basis of mitigation strategies. **Appl. Energy**. v.56, p. 433–444. 1997.

CAI, Z.; SHAN, Y.; XU. Effects of nitrogen fertilization on CH₄ emissions from rice fields. **Soil Science and Plant Nutrition**, v.53, n.4, p.353-361, 2007.

CAI, Z.; XING, G.; YAN, X.; XU, H.; TSURUTA, H.; YAGI, K. & MINAMI, K. Methane and nitrous oxide emissions from rice paddy fields as affected by nitrogen fertilisers and water management, **Plant Soil**, 196:7-14, 1997.

CAMARGO, E. S. **Potencial de práticas agrícolas em mitigar as emissões de gases de efeito estufa na cultura do arroz irrigado.** 138p. Tese (Doutorado) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2015.

CAMARGO, F. A. O.; SANTOS, G. A.; ZONTA, E. Alterações eletroquímicas em solos inundados. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.29, n.1, p.171-180, 1999.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.375-470.

CERRI, C. C.; CERRI, C. E. P. Seqüestro de carbono em solos na América Latina. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 40-44, 2007.

CHRISTENSEN, B.T. Carbon in primary and secondary organomineral complexes. In: CARTER, M.R.; STEWART, B.A. (Eds.). Structure and organic matter storage in agricultural soils. **CRC Lewis**, Boca Raton, p.97-165, 1996.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **9º Levantamento de safras 2014/2015**. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>. Acessado em 06/07/2015.

CONCENÇO, G.; BATALHA, B. R.; LARUE, J. L.; GALON, L.; TIRONI, S. P.; MANTOVANI, E. C.; ROLFES, C. R.; SILVA, A. A. Eficiência do uso da água na produção de arroz sob irrigação mecanizada ou inundação. In: **Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado**, 6, Anais, Porto Alegre, RS. 2009.

CONRAD, R. Control of microbial methane production in wetland rice fields. **Nutr. Cycl. Agroecosyst.**, 64:59-69, 2002.

CONRAD, R. Soil micro-organisms as controllers of atmospheric trace gases (H₂, CO₂, CH₄, OCS, N₂O and NO). **Microbiological Reviews**, v.60, n.4, p.609-640, 2005.

COPETTI, A. C. C., SILVA, L. S., DRESCHER, G. L., MÜLLER, E. A., BUSANELLO, R. L., VIEIRA, F. C. B. EFFECT OF RICE STRAW AND NITRATE LEVELS IN SOIL SOLUTION ON NITROUS OXIDE EMISSION. **Rev. Bras. Ciência do Solo**, Viçosa , v. 39, n. 2, p. 458-465, Apr. 2015.

CORRÊA, N. I.; CAICEDO, N. L.; FEDDES, R.; LOUZADA, J. A. S.; BELTRAME, L. F. Consumo de água na irrigação do arroz por inundação. **Lavoura Arrozeira**, v. 50, n. 432, p. 3-8, 1997.

COSTA, F. S. **Estoques de carbono orgânico e efluxos de dióxido de carbono e metano de solos em preparo convencional e plantio direto no subtrópico brasileiro**. 129 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

COSTA, F. S.; BAYER, C.; LIMA, M. A.; FRIGHETTO, R. T. S.; MACEDO, V. R. M.; MARCOLINI, E. Variação diária da emissão de metano em solo cultivado com arroz irrigado no Sul do Brasil. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.38, n.7, p. 2049-2053, 2008b.

COSTA, F. S.; ZANATTA, J. A.; BAYER, C. Emissões de gases de efeito estufa em agroecossistemas e potencial de mitigação. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. (Org.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Metrópole, p.545-559. 2008a.

COUNCE, P.A.; KEISLING, T.C. & MITCHELL, A.J. A uniform, objective, and adaptive system for expressing rice development. **Crop Science**, v. 40, n. 2, p. 436-443, 2000.

CRUTZEN, P.J, STOERMER, E.F. The “Anthropocene.” **IGBP Newsl.** 41:12–14, 2000.

DAVIDSSON, T.E.; LEONARDSON, L. Production of nitrous oxide in artificially flooded and drained soils. **Wetlands Ecology and Management**, Dordrecht, v. 5, p. 111-119, 1997.

DUBEY, S.K. Microbial ecology of methane emission in rice agroecosystem: a review. **Applied ecology and environmental research**, Penkala, v.3, n.2, p.1-27, 2005.

EMBRAPA. **Primeiro inventário brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa: emissões de óxido nitroso proveniente de solos agrícolas**. Ministério da Ciência e Tecnologia, Brasília, 2006.

FORSTER, P.; RAMASWAMY, V.; ARTAXO, P.; BERNTSEN, T.; BETTS, R.; FAHEY, D.W.; HAYWOOD, J.; LEAN, J.; LOWE, D.C.; MYHRE, G.; NGANGA, J.; PRINN, R.; RAGA, G.; SCHULZ, M.; van DORLAND, R. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing. In: SOLOMON, D.; QIN, D.; MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K.B.; TIGNOR, M.; MILLER H. L. **Climate change 2007: the physical science basis**. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge : Cambridge University Press. 2007. p. 129-234.

GOMES, A. S.; PAULETTO, E. A.; VERNETTI Jr., F. J.; SOUSA, R. O. Plantio direto e cultivo mínimo em arroz irrigado. In: GOMES, A. S.; MAGALHÃES Jr., A. M. **Arroz irrigado no Sul do Brasil**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. Cap.12, p.349-386.

GOMES, J.; BAYER, C.; COSTA, F.S.; PICCOLO, M.C.; ZANATTA, J.A.; VIEIRA, F.C.B. & SIX, J. Soil nitrous oxide emissions in long-term cover crops-based rotations under subtropical climate. **Soil Till. Res.**, 106:36-44, 2009.

GRAUPE, F. A.; SILVA, L. S.; BAYER, C.; BUNDT, A. C.; LIMA, M. A.; POCOJESKI, E. Efluxo de metano em dois solos do RS sob cultivo de arroz irrigado por alagamento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 31., 2007, Gramado. **Livro de Resumos**. Gramado, 2007.

HANSON, R. S & HANSON, T. E. Methanotrophic bacteria, **Microbiology and Molecular Biology Reviews**, v.60, n.2, p.439-471, 1996.

HEIMAN, M., 2011. Enigma of the recent methane budget. **Nature** 476, 157e158.

HOLZAPFEL-PSCHORN, A & SEILER, W. Methane emission during a cultivation period from an Italian rice paddy, **J. Geophy. Res.** 91, p. 11803-11814, 1986.

HOU, A. X.; CHEN, G. X.; WANG, Z. P.; van Cleemput, O.; PATRICK Jr., W. H. Methane and nitrous oxide emissions from a rice field in relation to soil redox and microbiological processes. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.64, p.2180-2186, 2000.

IIDA, T.; DEB, S. K.; KHARBUJA, R. G. Nitrous oxide emission measurement with acetylene inhibition method in paddy fields under flood conditions. **Paddy and Water Environmental**, Berlim, v. 5, p. 83-91, 2007.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate change 1994: radiative forcing of climate change**. New York : Cambridge University, 1995. p.85-87.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2007.

IRGA - **Instituto Rio Grandense do Arroz**. Disponível em: <<http://www.irga.rs.gov.br/conteudo/safras>> Acesso em: 13 ago. 2016.

IRRI-International Rice Research Institute. **Rice Facts**. Disponível em: <<http://irri.org>>. Acesso em: 23 mai. 2015.

ITOH, M. Mitigation of methane emissions from paddy fields by prolonging midseason drainage Agriculture. **Ecosystems and Environment**, v. 141, p. 359- 372, 2011.

JOHNSON-BEEBOUT, S.E.; ANGELES, O.R.; ALBERTO, M.C.R.; BURESH, R.J. Simultaneous minimization of nitrous oxide and methane emission from rice paddy soils is improbable due to redox potential changes with depth in a greenhouse experiment without plants. **Geoderma**. Amsterdam, v. 149, p. 45-53, 2009.

KAEWPRADIT, W.; TOOMSAN, B.; VITYAKON, P.; LIMPINUNTANA, V.; SAENJAN, P.; JOGLOY, S.; PATANOTHAI, A.; CADISCH, G. Regulating mineral N release and greenhouse gas emissions by mixing groundnut residues and rice straw under field conditions. **European Journal of Soil Science**, v.59, p.640-652, 2008.

KASTERINE, A.; VANZETTI, D. The effectiveness, efficiency and equity of market-based instruments to mitigate GHG emission from the agri-food sector. **UNCTAD Trade and Environment Review**, Geneva, 2009/2010. Disponível em: <<http://www.intracen.org> > Acesso em: 15 jun. 2015

KIM, G.Y. et al. Effect of Intermittent Drainage on Methane and Nitrous Oxide Emissions under Different Fertilization in a Temperate Paddy Soil During Rice Cultivation. **Journal Korean Society for Applied Biological Chemistry**, New York, v. 57, n. 2, p. 229-336, 2014.

KO, J. Y.; KANG, H. W. The effects of cultural practices on methane emission from rice fields. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 58, p.311-314, 2000.

KÖGEL-KNABNER, I.; AMELUNG, W.; CAO, Z.; FIEDLER, S.; FRENZEL, P.; JAHN, R.; KALBITZ, K.; KÖLBL, A.; SCHLOTTER, M. Biogeochemistry of paddy soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 157, p. 1-14, 2010.

KUDO, Y. et al. The effective water management practice for mitigating greenhouse gas emissions and maintaining rice yield in central Japan. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 186, p.77-85, 2014.

LE MER, J.; ROGER, P. Production, oxidation, emission and consumption of methane by soils: a review. **European Journal of Soil Biology**, Paris, v.37, n.1, p.25-50, 2001.

LIMA, M. A.; PESSOA, M. C. P. Y.; VILELLA, O. V. Emissão de Metano em Cultivo de Arroz Irrigado por Inundação. In: LIMA, M. A. et al. (Ed.) **Estoques de carbono e emissões de gases de efeito estufa na agropecuária brasileira**. Brasília: EMBRAPA, 2013. p. 93-139.

LINDAU, C. W.; PATRICK Jr., W. H.; DELAUNE, R. D. Factors affecting methane production in flooded rice soils. In: HARPER, L.A; MOSIER, A. R.; DUXBURY, J. M. (Eds.). **Agricultural ecosystem effects on trace gases and global climate change**. Wisconsin: American Society of Agronomy, 1993, p.157-165. (ASA Special Publication, 55).

LIU, S.; QIN, Y.; ZOU, J.; LIU, Q. Effects of water regime during rice-growing season on annual direct N₂O emission in a paddy rice-winter wheat rotation system in southeast China. **Science of the Total Environment**. Amsterdam, v. 408, p. 906-913, 2010.

MA, Y.C. et al. Net global warming potential and greenhouse gas intensity of annual rice–wheat rotations with integrated soil–crop system management. **Agriculture, Ecosystems and Environment**. Amsterdam, v.164, p. 209-219, 2013.

MASSONI, P.F.S et al . Influência de manejos pós-colheita do arroz irrigado sobre o banco de sementes de arroz-vermelho. **Planta daninha**, Viçosa , v. 31, n. 1, p. 89-98, Mar. 2013.

MCT, 2010 - Second National Communication of Brazil to the United Nations Framework Convention on Climate Change. 264p. — Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia, 2010.

MENEZES, V. G. et al. **Projeto 10 – Estratégias de manejo para aumento da produtividade e da sustentabilidade da lavoura de arroz irrigado do RS: avanços e novos desafios**. Porto Alegre: IRGA - Instituto Rio Grandense do Arroz, 2012.

MEZZOMO, R. **Irrigação contínua e intermitente em arroz irrigado: uso de água, eficiência agrônômica e dissipação de imazethapyr, imazapic e fipronil**. 2009. 61 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

MINAMI, K.; YAGI, K. Method of measuring methane flux from rice paddies. **Japanese Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, v. 59, p. 458-463, 1988. (in Japanese with English Summary).

MINAMIKAWA, K. & SAKAI, N. The effect of water management based on soil redox potential on methane emission from two kinds of paddy soils in Japan. **Agric. Ecosys. Environ.**, 107:397- 407, 2005.

MOSIER, A. R. Chamber and isotope techniques. In. ANDREAE, M. O.; SCHIMEL, D. S. (Eds.). **Exchange of traces gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere: report of the Dahlem Workshop**. Berlin: Wiley. p.175-187, 1989.

MOTERLE, D.F. **Efluxo de metano em solo sob manejos de irrigação e cultivares de arroz irrigado**. 2011.146f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

MOTERLE, D. F. et al. Methane efflux in rice paddy field under different irrigation managements. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.37, p. 431-437, 2013.

MÜLLER, E. A.; SILVA, L. S.; MOTERLE, D. F.; OLIVEIRA, J. M. S.; SCOTTO, M. A. L.; FAGUNDES, R. L. Emissão de metano e sua relação com características de cultivares de arroz. In: **Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado**, 7, Anais, v.2, p.421-424, Camboriú-SC, 2011.

NEUE, H. U.; GAUNT, J. L.; WANG, Z. P.; BECKER-HEIDMANN, P.; QUIJANO, C. Carbon in tropical wetlands. **Geoderma**, Amsterdam, v.79, n.1-4, p.163-185, 1997.

NOUCHI, I. et al. Seasonal variation in methane flux from rice paddies associated with methane concentration in soil-water, rice biomass and temperature, and its modeling. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 161, p. 195-208, 1994.

NOUCHI, I.; MARIKO, S.; AOKI, K. Mechanisms of methane transport from the rhizosphere to the atmosphere through rice plants. **Plant Physiology**, Baltimore, v.94, n.1, p.59-66, 1990.

OLK, D.C.; SENESI, N. Properties of chemically extracted soil organic matter in intensively cropped lowland rice soils. In: KIRK, G.J.D.; OLK, D.C. (Eds.). **Carbon and nitrogen dynamics in flooded soils**. Los Banos: International Rice Research Institute, 2000.

PANDEY, A. et al. Organic matter and water management strategies to reduce methane and nitrous oxide emissions from rice paddies in Vietnam. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 196, p.137-146, 2014.

PARFITT, J.M.B.; PINTO, M.A.B.; TIMM, L.C.; BAMBERG, A.L.; SILVA, D.M.; BRETANHA, G. Manejo da irrigação por aspersão e desempenho da cultura do arroz. In: **Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado**, 7, Camboriú-SC, Anais, v.2, 2011. p.461-464-535.

PINTO, M.A.B. **Resposta da cultura do arroz irrigada por aspersão a diferentes tensões de água no solo**. 2015. 68p. Tese - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Área de Concentração: Solos. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas - Brasil.

PONNANPERUMA, F. N. The chemistry of submerged soils. **Advances in Agronomy**, New York, v.24, p.29-96, 1972.

PUSATJAPONG, W.; KERDCHOECHUEN, O.; TOWPRAYOON, S. Glucose, Fructose, and Sucrose Accumulation in Root and Root Exudate of Rice cv. Supanburi 1. **KMUTT Res. Develop. J.** 26 (3), 339–350, 2003.

RATERING, S. & CONRAD, R. Effects of short-term drainage and aeration on the production of methane in submerged rice soil. **Glob. Chang. Biol.**, 4:397-407, 1998.

REDDY, K.R., DELAUNE, R.D., **Biogeochemistry of Wetlands: Science and Applications**. CRC Press. Boca Raton, FL. 2008.

REDDY, P. P. Causes of Climate Change. In: **CLIMATE Resilient Agriculture for Ensuring Food Security**. India: Springer, 2015. p. 17-26.

REVISTA LAVOURA ARROZEIRA. Disponível em:

<https://issuu.com/lavouraarrozeira/docs/lavoura_arrozeira_completa_web> Acesso em: 13 ago. 2016

RICE, C.W. Introduction to special section on greenhouse gases and carbon sequestration in agriculture and forestry. **J. Environ. Qual.**, v.35, p.1338-1340, 2006.

ROSA, C. M.; ZSCHORNACK, T.; BAYER, C.; GOMES, J.; SILVA, P. R. F.; VIEIRA, V. M. Emissão de CH₄ e N₂O no cultivo de arroz irrigado influenciada por diferentes aportes de resíduo de azevém. In: **Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado**, 7, Anais, v.2, p.591-594, Camboriú-SC, 2011.

RUDDIMAN, W.F., 2013. **The Anthropocene**. Annual Review of Earth and Planetary Sciences 41, 45 e 68.

RUSCHEL, A.P. O efeito estufa e a cultura arrozeira. **Lavoura Arrozeira**, Porto Alegre, v.45, n.401, p.3-4, 1992.

SANTOS, A. B.; FAGERIA, N. K.; STONE, L. F.; SANTOS, C. Manejo de água e de fertilizante potássico na cultura de arroz irrigado. **Pesquisa agropecuária Brasileira**, v. 34, p. 565-573, 1999.

SASS, R. L.; CICERONE, R. J. Photosynthate allocations in rice plants: food production or atmospheric methane? **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, Washington, v. 99, n. 19, p. 11993-11995, 2002.

SASS, R. L.; FISHER, F. M.; WANG, Y. B.; TURNER, F. T.; JUND, M. F. Methane emission from rice fields: The effect of flood water management. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 6, p. 249-262, 1992.

SCHIMEL, J. P.; HOLLAND E. A.; VALENTINE, D. Controls on methane flux from terrestrial ecosystems. In: HARPER, L.A; MOSIER, A. R.; DUXBURY, J. M. (Eds.). **Agricultural ecosystem effects on trace gases and global climate change**. Wisconsin: American Society of Agronomy, 1993, p.167-182. (ASA Special Publication, 55)

SCHIMEL, J. Rice, microbes and methane. **Nature**, London, v.403, n.6768, p.375-377, 2000.

SCHOENFELD, R. **Sistema de rotação arroz e soja em sucessão a plantas de cobertura em Planossolo Háplico**. 2010. 58 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

SEBACHER, D. L.; HARRIS, R. C.; BARTLETT, K. B. Methane emissions to the atmosphere through aquatic plants. **Journal of Environmental Quality**. 14:40-46. 1985.

SHERLOCK, R. R.; SOMMER, S. G.; KHAN, R. Z.; WOOD, C. W.; GUERTAL, E. A. FRENEY, J. R. DAWSON, C. O.; CAMERON, K. C. Ammonia, methane, and

nitrous oxide emission from pig slurry applied to a pasture in New Zealand. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 31, p. 1491-1501, 2002.

SILVA, C. A. S.; PARFITT, J. M. B. Drenagem superficial para diversificação do uso dos solos de várzea do Rio Grande do Sul. Circular Técnica 40, Embrapa Clima Temperado, Pelotas/RS. 2004. 10p.

SILVA, L. S.; GRIEBELER, G.; MOTERLE, D. F.; BAYER, C.; ZSCHORNACK, T.; POCOJESKI, E. Dinâmica da emissão de CH₄ em solos representativos do cultivo de arroz irrigado no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 473-483, 2011.

SILVA, L. S.; SOUSA, R. O.; POCOJESKI, E. Dinâmica da matéria orgânica em ambientes alagados. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. **Fundamentos da Matéria Orgânica do Solo**. Porto Alegre: Metrópole, Cap.27, p.525-544. 2008.

SINGARAYER, J.S., VALDES, P.J., FRIEDLINGSTEM, P., NELSON, S., BEERLING, D.J. Late Holocene methane rise caused by orbitally controlled increase in tropical sources. *Nature* 470, 82 e 84, 2011.

SILVA, J. J. C. THIESEN, G., IDEHARA, S. J., SILVA, J. L. S., ANDRES, A. Increasing the effectiveness of the land manure after irrigated rice harvest. **Revista Científica Eletrônica de Agronomia** – ISSN: 1677-0293, Garça/SP, n.28, p.40-50, dez. 2015.

SILVA, J. T. **Emissões de metano e de óxido nitroso em área de arroz irrigado influenciadas por sistemas de preparo do solo**. 70p. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS, 2014.

SINGH, S.; SINGH, J.S.; KASHYAP, A.K. Methane flux from irrigated rice fields in relation to crop growth and N-fertilization. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.31, n.8, p.1219-1228, 1999.

SMITH, K. A., DOBBIE, K. E., BALL, B. C., BAKKEN, L. R., SITAULA, B. K., HANSEN, S. Oxidation of atmospheric methane in Northern European soils, comparison with other ecosystems, and uncertainties in the global terrestrial sink. **Global Change Biology** 6, 791–803, 2000.

SMITH, P., MARTINHO, D., CAI, Z., GWARY, D., JANSEN, H., KUMAR, P., Greenhouse gas mitigation in agriculture. **Philosophical transactions of the Royal Society**. B 363, 789-813, 2008.

SNYDER, C.S. et al. Review of greenhouse gas emission from crop production system and fertilizer management effects. **Agriculture, Ecosystem and Environment**, Amsterdam, v. 133, p. 247-266, 2009.

SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO – SOSBAI. Arroz Irrigado: **Recomendações Técnicas da Pesquisa para o Sul do Brasil**. Itajaí - SC, 2012, 179p.

SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO - SOSBAI. Arroz Irrigado: **Recomendações Técnicas da Pesquisa para o Sul do Brasil**. Santa Maria, 2014, 189p.

SOUSA, R. O. **Oxirredução em solos alagados afetada por resíduos vegetais**. 2001. 164f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SOUSA, R.O.; BOHNEN, H.; MEURER, E.J. Composição da solução de um solo alagado conforme a profundidade e o tempo de alagamento, utilizando novo método de coleta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.26, p.343-348, 2002.

SOUZA, E. L.; FREITAS, L. L.; SCHMATZ, R.; SKOLAUDE, A. C.; DIETRICH, G.; BINOTTO, I.; MARCHESAN, E.; GIACOMINI, S. J. Fluxo de metano no período de entrassafra e de cultivo do arroz irrigado sob diferentes sistemas de manejo da palha. In: **Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado**, 7, Anais, v.2, p.554-557, Camboriú-SC, 2011.

SOUZA, E.L. **Emissão de Óxido Nitroso e Metano em Área de Cultivo com Arroz Irrigado com diferentes Manejos da Palha Pós-Colheita**. 2013. 139p. Tese - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. Universidade Federal de Santa Maria - Brasil.

STEFFEN, W.; CRUTZEN, P.; McNEIL, JR. 2007. The Anthropocene: Are humans now overwhelming the great forces of nature? **Ambio** 36:1317–21

STONE, L. F. **Eficiência do uso da água na cultura do arroz irrigado**. Santo Antônio de Goiás, GO: Embrapa Arroz e Feijão, 2005. 48 p.

STRECK, E.V.; KAMPF, N.; DALMOLIN, R.S.D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P.C.; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E.; PINTO, L.F.S. As principais classes de solos identificadas no Rio Grande do Sul. In: **Solos do Rio Grande do Sul**. 2. ed. revista e ampliada. Porto Alegre: EMATER/RS-ASCAR. 222p. 2008.

SUBADIYASA, N.; ARYA, N.; KIMURA, M. Methane emissions from paddy fields in Bali Island, Indonesia. **Soil Science & Plant Nutrition**, Tokyo, v.43, n.2, p.387-394, 1997.

TEDESCO, M.J. GIANELLO, C.; BISSANI, C.A ; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S.J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. rev. e ampl. Porto Alegre: Departamento de Solos da UFRGS. 1995. 174 p. (Boletim Técnico de Solos, n.5)

TOWPRAYOON, S.; SMAKGAHN, K.; POONKAEW S. Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from drained irrigated rice fields. **Chemosphere**. v.59(11), p.1547–1556. 2005.

TYAGI, L. KUMARI, B. & SINGH, S.N. Water management – A tool for methane mitigation from irrigated paddy fields. **Science of Total Environment**, v. 408, n. 5, p. 1085-1090, 2010.

TYLER, S.C. et al. Methane oxidation and pathways of production in a Texas paddy field deduced from measurements of flux d-13C, and d-D of CH₄. **Global Biogeochemical Cycles**, Washington, v. 11, p. 323–348, 1997.

VAHL, L. C.; SOUSA, R. O. Aspectos físico-químicos de solos alagados. In: GOMES, A. S.; MAGALHÃES Jr., A. M. **Arroz Irrigado no Sul do Brasil**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. Cap.4, p. 97-118.

VEÇOZZI, T. A. **Eficiência agronômica de fertilizante nitrogenado de liberação controlada e seus efeitos nas emissões de metano e óxido nitroso em arroz irrigado**. 111p. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS, 2015.

VERNETTI JR, F. J.; GOMES, A. S.; SCHUCH, L. O. B. Sucessão de culturas em solos de várzea implantadas nos sistemas plantio direto e convencional. **Revista Brasileira Agrociência**, Pelotas, v. 15, n.1-4, p.37-42, jan-dez, 2009.

WATANABE, A.; TAKEDA, T.; KIMURA, M. Evaluations of origins of CH₄ carbon emitted from rice paddies. **Journal of Geophysical Research**, Washington, v.104, n.D19, p.23623-23629, 1999.

WELLER, S. et al. Methane and nitrous oxide emissions from rice and maize production in diversified rice cropping systems. **Nutrient Cycles Agroecosystems**, Dordrecht, v. 101, p. 37-53, 2015.

WESTCOTT, M.P. & VINES, K.W. Comparing sprinkler irrigation and flood irrigation for rice. **Lousiana Agriculture**. 30(1): 20-22. 1986.

WESZ, J. **Mitigação das emissões de metano e óxido nitroso em Planossolo pela adequação do manejo da água em cultivo de arroz irrigado**. 62p. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS, 2012.

WESZ, J.; SOUSA, R. O.; SCIVITTARO, W. B.; PILLON, C. N.; BAYER, C.; WOLTER, R. C. D.; et al. Influência do manejo da irrigação nos fluxos de metano e óxido nitroso no cultivo de arroz irrigado. In: **Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado**, 7, Anais, v.2, p.532-535, Camboriú-SC, 2011.

YANG, S. S.; CHANG, H. L. Effect of environmental conditions on methane production and emission from paddy soil. **Agriculture, Ecosystems & Enviroment**, Amsterdam, v.69, n.1, p.69-80, 1998.

YAO, Z., ZHENG, X., DONG, H., WANG, R., MEI, B., ZHU, J. A 3-year record of N₂O and CH₄ emissions from a sandy loam paddy during rice seasons as affected by different nitrogen application rates. **Agricul. Ecosyst. Environ.** 152, 1–9, 2012.

YAO, Z. S., ZHENG, X. H., WANG, R., DONG, H. B., XIE, B. H., MEI, B. L., ZHOU, Z. X., ZHU, J. G. Greenhouse gas fluxes and NO release from a Chinese subtropical rice– winter wheat rotation system under nitrogen fertilizer management. **J. Geophys. Res.** 118, 623–638, 2013

YU, K. W.; WANG, Z. P.; CHEN, G. X. Nitrous oxide and methane transport through rice plants. **Biology Fertility Soils**. 24:341–343, 1997.

YU, K.; PATRICK, W.H. Jr. Redox Window with Minimum Global Warming Potential Contribution from Rice Soils. **Soil Science Society America Journal**, v. 68, p. 2086-2091, 2004.

ZHANG, G.; ZHANG, X.; MA, J.; XU, H.; CAI, Z. Effect of drainage in the fallow season on reduction of CH₄ production and emission from permanently flooded rice fields. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 89, n. 1, p.81-91, 2011.

ZHANG, G.; ZHANG, X.; MA, J.; XU, H.; CAI, Z. Effect of drainage in the fallow season on reduction of CH₄ production and emission from permanently flooded rice fields. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 89, n. 1, p. 81-91, 2010.

ZHOU, M., ZHU, B., BRÜGGEMANN, N., WANG, X., ZHENG, X., BUTTERBACH-BAHL, K. Nitrous oxide and methane emissions from a subtropical rice–rapeseed rotation system in China: a 3-year field case study. **Agric. Ecosyst. Environ**, 212, 297–309, 2015.

ZHOU, M. H., Zhu, B., BUTTERBACH-BAHL, K., WANG, X., ZHENG, X., Nitrous oxide emissions during the non-rice growing seasons of two subtropical rice-based rotation systems in southwest China. **Plant Soil** 383, 401–414. 2014.

ZSCHORNACK, T. **Emissões de metano e de óxido nitroso em sistemas de produção de arroz irrigado no sul do Brasil e potencial de mitigação por práticas de manejo**. 101p. Tese (Doutorado) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2011.

8 APÊNDICES:

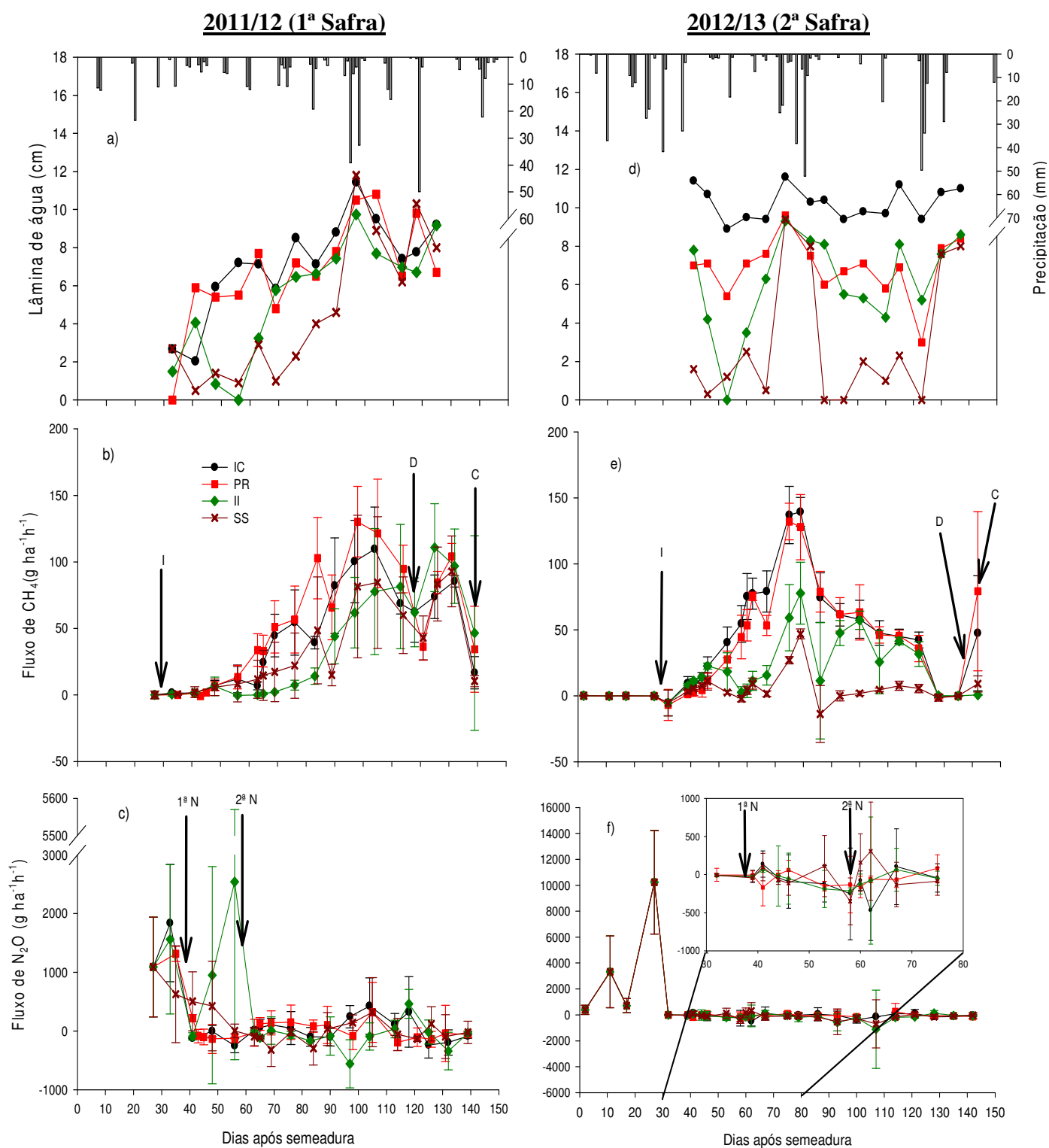


Figura 21. Fluxos de CH_4 e de N_2O em um Planossolo cultivado com arroz irrigado por diferentes manejos da irrigação em duas safras, sendo: (“a” e “d”) a lâmina de água e a precipitação nos tratamentos avaliados; (“b” e “e”) o fluxo de CH_4 e, (“c” e “f”) o fluxo de N_2O , nas safras 2011/12 e 2012/13, respectivamente. I = início da irrigação; D = supressão da irrigação; C= colheita; 1ª e 2ª N = adubações de cobertura de N. IC: Inundação Contínua; PR: Inundação Contínua por Período Reduzido; II: Inundação Intermitente; SS: Solo Saturado. Barras verticais representam o desvio padrão da média.

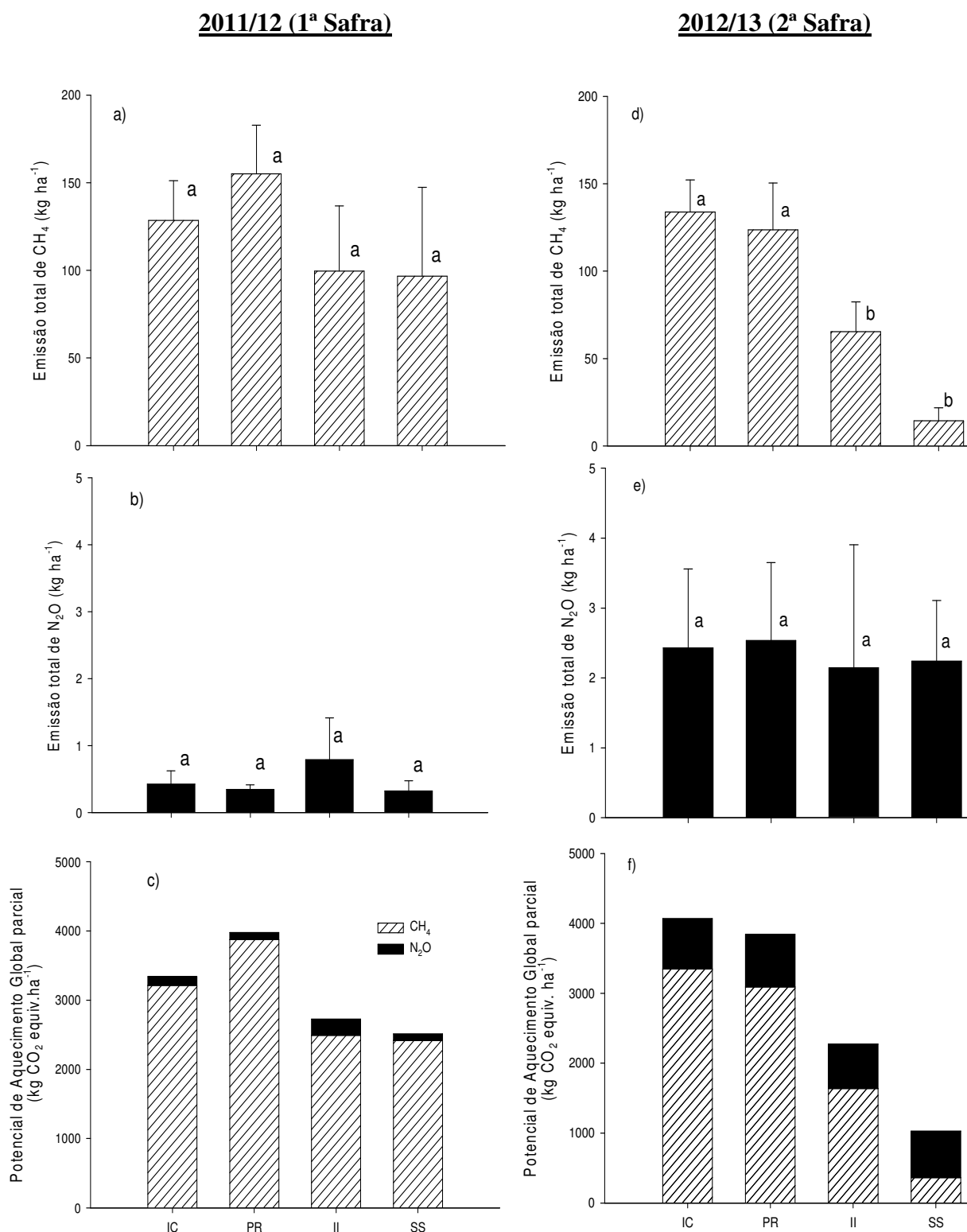


Figura 22. Emissão total de CH₄ (“a” e “d”) e de N₂O (“b” e “e”) e, o Potencial de Aquecimento Global parcial (PAGp) (“c” e “f”) nas safras 2011/12 (1ª Safra) e 2012/13 (2ª Safra), respectivamente. IC: Inundação Contínua; PR: Inundação Contínua por Período Reduzido; II: Inundação Intermitente; SS: Solo Saturado. Barras verticais representam o desvio padrão da média.

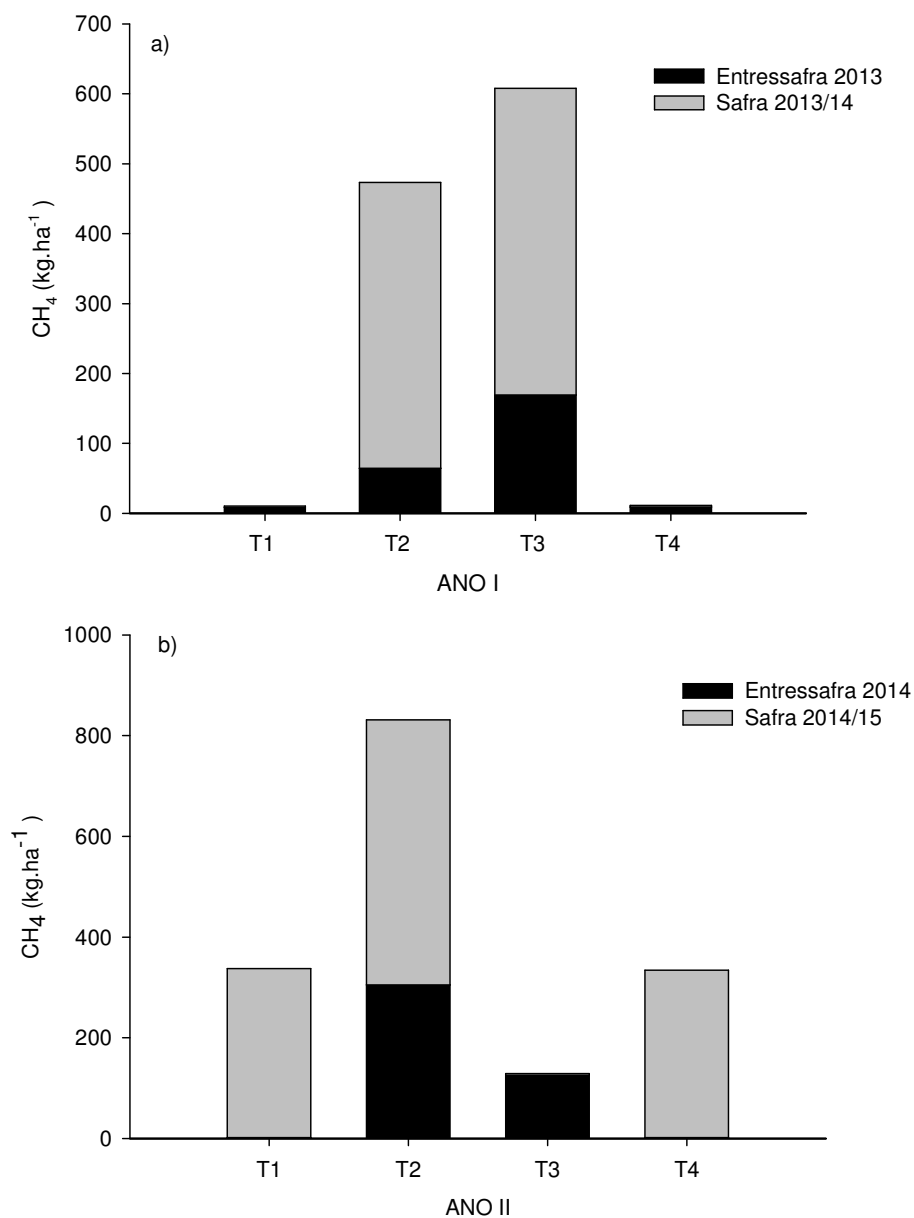


Figura 23. Emissão total de CH₄ na entressafra 2013 e safra 2013/14 (a) e, entressafra 2014 e safra 2014/15 (b) em Planossolo Háplico cultivado com arroz e soja sob diferentes sistemas de preparo de solo: Arroz/soja/arroz (T1); Arroz/arroz/arroz (T2); Arroz/arroz/soja (T3); Arroz/soja/arroz c/ prep.(T4).

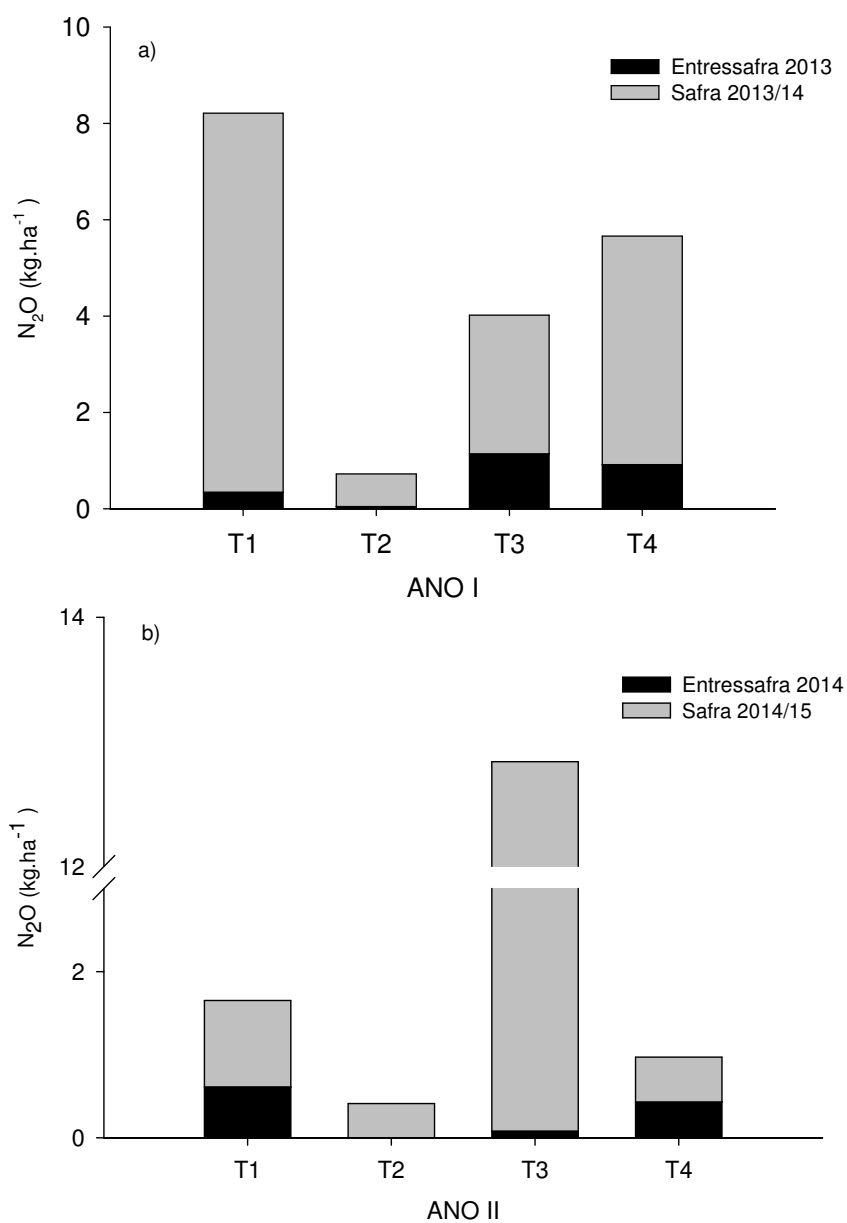


Figura 24. Emissão total de N₂O na entressafra 2013 e safra 2013/14 (a) e, entressafra 2014 e safra 2014/15 (b) em Planossolo Háplico cultivado com arroz e soja sob diferentes sistemas de preparo de solo: Arroz/soja/arroz (T1); Arroz/arroz/arroz (T2); Arroz/arroz/soja (T3); Arroz/soja/arroz c/ prep.(T4).

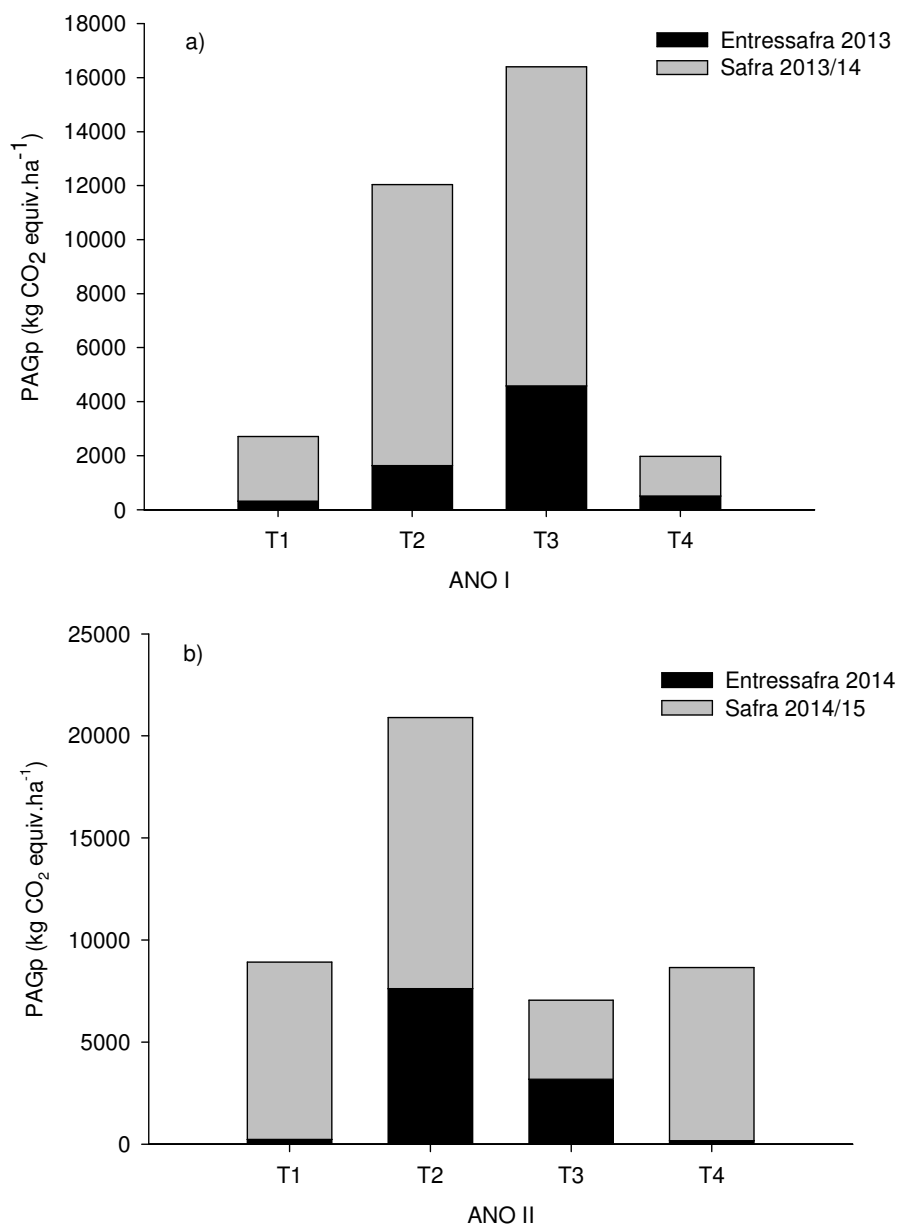


Figura 25. Potencial de Aquecimento Global parcial (PAGp) na entressafra 2013 e safra 2013/14 (a) e, entressafra 2014 e safra 2014/15 (b) em Planossolo Háplico cultivado com arroz e soja sob diferentes sistemas de preparo de solo: Arroz/soja/arroz (T1); Arroz/arroz/arroz (T2); Arroz/arroz/soja (T3); Arroz/soja/arroz c/ prep.(T4).